

CUADERNOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Publicaciones Académicas

8 | 2014



EDICIONES
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA
SALTA - ARGENTINA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA
AUTORIDADES

Rector	Pbro. Lic. Jorge Antonio Manzaráz
Vicerrectora Académica	Mg. Dra. Isabel Virgili de Rodríguez
Vicerrectora Administrativa	Mg. Lic. Graciela Pinal de Cid
Vicerrectora de Investigación y Desarrollo	Dra. Ing. Lía Elizabet Orosco Segura
Vicerrector de Formación	Pbro. Prof. Francisco Núñez
Secretario Académico	Dr. Gustavo Adolfo Figueroa Jerez

FACULTAD DE INGENIERÍA

Decano	Mg. Ing. Néstor Eugenio Lesser
Secretaria Académica	Dra. Amalia Susana Aramayo Alesso
Secretaria Técnica	Sec. Ej. Andrea Avelina Burgos
Jefe del Dpto. de Investigación	Dr. Ing. Javier Moya
Jefe del Dpto. de Extensión, Graduados y Bienestar	Ing. Abel Aguirre Barey
Jefe del Dpto. de Ingeniería Industrial	Ing. Eudoro Díaz de Vivar
Jefe del Dpto. de Ingeniería Civil	Ing. Fernando Javier Albarraacín
Jefe del Dpto. de Ingeniería en Informática	Ing. Guillermina Nieves
Jefe del Dpto. de Ingeniería en Telecomunicaciones	Ing. Roberto Daniel Breslin
Coordinador de Laboratorios	Esp. Ing. Manuel L. Zambrano Echenique

EDITORIAL EUCASA

Directora	Rosanna Caramella de Gamarra
Edición	Soledad Martínez de Lecuona
Comercialización	Mariana Remaggi

Los *Cuadernos de la Facultad de Ingeniería* son una publicación anual que reúne artículos originales de investigadores y docentes referidos a distintas áreas de la Ingeniería, con especial atención en la Ingeniería Civil, Industrial e Informática.

Año 8 / número 8 / noviembre 2014

ISSN 2422-6572 (On line)

ISSN 2422-6564

Domicilio editorial: Campus Universitario Castaños, 4400 Salta - Argentina.

Salta-Argentina-Tel./fax: (54-387) 426-8581

email: eucasa@ucasal.net

www.ucasal.net/eucasa

ÍNDICE

Comparación de diferentes modelos de la Teoría de Respuesta al Ítem Carlos Berejnoi, María A. Barros	5
Estudios estructurales y magnéticos de la aleación nanocristalina Fe ₈₁ Si ₆ B ₈ P ₄ Cu ₁ de bajo costo Soledad Gamarra Caramella, Leonardo Marta, Carlos Berejnoi, Javier A.Moya	17
On the variational derivation of boundary value problems on the dynamics of structural elements Ricardo Grossi	23
Telemetría de eventos sísmicos. Adquisición de datos, almacenamiento y transporte Pablo Rodrigo Narváez, Héctor Rizo, Ernesto Bonfiglioli, José Viramonte	37
Aplicación de técnicas de evolución diferencial para identificar líneas de rótulas en placas María Virginia Quintana	53
La ética en la formación y actividad profesional del Ingeniero José Marcelo Vera	67
Perfil académico de los autores	75

Nota Editorial

Una de las funciones sustantivas de la universidad es la investigación, que genera nuevo conocimiento y precisa su divulgación. La sociedad del mundo actual necesita contar con información de calidad sobre los distintos aspectos que la atraviesan y ésta debe partir, en gran medida, de los claustros universitarios.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta, con este octavo número de sus Cuadernos, promueve la mejora continua de la calidad educativa a través de la difusión de los resultados de los trabajos de docentes e investigadores del área.

Agradecemos a todos los autores su valioso aporte a la producción del conocimiento y su generosidad al compartirlo con la comunidad académica.

*Dra. Amalia Susana Aramayo Alesso
Secretaria Académica*

Comparación de diferentes modelos de la Teoría de Respuesta al Ítem¹

Carlos Berejnoi² & María A. Barros³

Resumen

La Teoría de Respuesta al Ítem (Item Response Theory o IRT), usada en psicología para medir o estimar rasgos o habilidades latentes de los individuos, tiene un importante campo de aplicación en lo que respecta a la evaluación en educación. Esta teoría permite, mediante modelos estadísticos, caracterizar los reactivos o ítems de una evaluación basándose en el nivel de dificultad, y además comparar el nivel de habilidad de cada estudiante frente a la dificultad de cada ítem, independientemente del nivel de los otros individuos que realizan la evaluación. En esta teoría, para reactivos cuyas respuestas son dicotómicas (correctas o incorrectas), es común el uso del modelo de Rasch, y de los modelos logísticos de uno (1PLM), dos (2PLM) o tres parámetros (3PLM). En este trabajo se presenta un análisis del ajuste del modelo de Rasch y de los modelos logísticos a los ítems de un examen parcial de Análisis Matemático I de la Facultad de Ingeniería de la UNSa. Por la complejidad que implica la estimación de los parámetros de los modelos, resulta necesario utilizar herramientas informáticas. En este trabajo se usó el software estadístico libre R con el paquete ltm.

Palabras clave: evaluación-Teoría de Respuesta al Ítem- Rasch- Modelos logísticos

1. Introducción

Si bien los modelos de la Teoría de Respuesta al Ítem (IRT) son encontrados mayormente en la literatura referida a evaluaciones psicológicas, ellos están siendo aplicados con mucho éxito en otros campos (Johnson, 2007). Una de las principales aplicaciones de estos modelos es en educación (Rizopoulos, 2006).

Uno de los aspectos básicos en el proceso de enseñanza-aprendizaje es conocer cuánto aprendió el estudiante, es decir, tener una medida de las habilidades por él desarrolladas. Es común utilizar para ello algún instrumento (prueba, evaluación, examen), compuesto por reactivos (ítems).

1. IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA, Santiago del Estero, octubre de 2013. Publicado en CD, ISSN 1853-7871

2. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta.

3. Colegio Secundario N°5081 «Raúl Ricardo Alfonsín», Salta.

Pero al hablar de cuánto, se debe establecer una escala de medición. La IRT se basa más en los ítems del examen que en el puntaje del mismo. Según la IRT, la habilidad (representada con el símbolo θ), es considerada como una variable continua real que puede ser medida en una escala que tiene un punto medio igual a cero (Baker, 2001). De esta manera se pueden comparar habilidades entre individuos, comparando el parámetro θ de cada uno de ellos.

Un aspecto muy interesante en esta teoría es que la habilidad de un individuo y el nivel de dificultad de un ítem se miden en la misma escala, siendo posible predecir mediante modelos estadísticos la probabilidad de éxito de un individuo (conocida su habilidad) frente a un ítem.

Existen diversos modelos estadísticos usados en la IRT. En este trabajo se comparan cuatro modelos en el ajuste de los resultados obtenidos en un examen parcial de Análisis Matemático I de la Facultad de Ingeniería de la UNSa, determinándose cuál es la mejor opción.

2. Modelos estadísticos

2.1 Curva característica del ítem

La IRT permite construir para cada reactivo la Curva Característica del Ítem (ICC), una función que indica la probabilidad de éxito en la respuesta, dependiendo del nivel de habilidad latente del individuo (Rizopoulos, 2008).

Para reactivos donde la respuesta es dicotómica (se admite sólo la posibilidad de correcta o incorrecta) la probabilidad de éxito será:

$$p = P(X=1) = \frac{\exp(f(\theta))}{1 + \exp(f(\theta))} \quad (1)$$

El símbolo X es una variable aleatoria que indica que la respuesta es correcta ($X=1$) o

incorrecta ($X=0$).

Según la expresión que tome la función $f(\theta)$ se tiene (Rizopoulos, 2010):

- Modelo de Rasch: supone que todos los reactivos tienen el mismo grado de discriminación.

La probabilidad de éxito en la respuesta está dada por:

$$p = \frac{\exp(\theta - \delta_i)}{1 + \exp(\theta - \delta_i)} \quad (2)$$

El símbolo δ_i es el parámetro de dificultad del ítem i . Tanto él como θ se refieren a la misma escala de medición.

Según la ecuación (2), en este modelo la probabilidad de éxito es una función de la diferencia entre la habilidad de una persona y la dificultad del ítem (Wu y Adams, 2007). Si ambas son iguales, la probabilidad de éxito es 0.5. En la Fig. 1 se observa esta propiedad en una ICC correspondiente a un ítem de dificultad igual a -0.4.

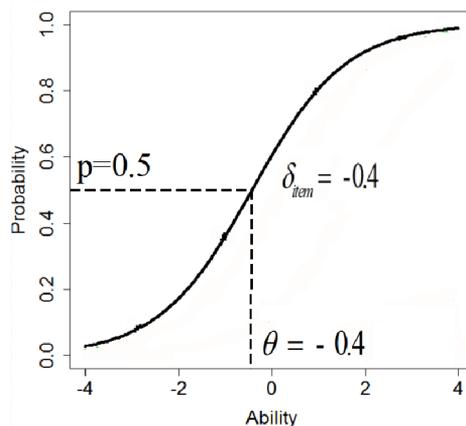


Figura 1. Ejemplo de ICC de un ítem según el modelo de Rasch.

Cuanto mayor sea δ_i , más a la derecha se posicionará la curva ICC, y mayor será la dificultad del ítem: para un individuo con determinada habilidad, su probabilidad de éxito resultará menor. Las curvas de los diferentes ítems no se cruzan.

Trabajando la ecuación (1), se llega a:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \theta - \delta_i \quad (3)$$

La ecuación (3) muestra que la diferencia entre los parámetros del individuo y del ítem, en el modelo Rasch, es el logaritmo natural de la razón de probabilidad (*odds* en inglés) de éxito de una persona sobre el ítem. La unidad de medida en la escala para θ y δ_i se conoce como *logit*. Este término proviene de la contracción de la expresión en inglés *log odds unit* (Wu & Adams, 2007).

- Modelo Logístico de un parámetro (1PLM): surge el parámetro de discriminación (α), pero supone que es el mismo para todos los ítems.

$$p = \frac{\exp[\alpha(\theta - \delta_i)]}{1 + \exp[\alpha(\theta - \delta_i)]} \quad (4)$$

El modelo de Rasch es un caso particular del 1PLM, donde $\alpha = 1$.

- Modelo Logístico de dos parámetros (2PLM): la función de probabilidad tiene en cuenta los parámetros de dificultad (δ_i) y discriminación (α_i) de cada ítem

$$p = \frac{\exp[\alpha_i(\theta - \delta_i)]}{1 + \exp[\alpha_i(\theta - \delta_i)]} \quad (5)$$

El parámetro α_i se puede interpretar como la «pendiente» de la ICC. Cuanto más elevado sea su valor, el ítem nos permitirá diferenciar más los estudiantes según sus habilidades. En este caso las curvas ICC pueden cruzarse, a diferencia de lo que ocurriría con los dos modelos anteriores. En la Fig 2 se observan dos ICC de igual nivel de dificultad pero con diferentes valores de α .

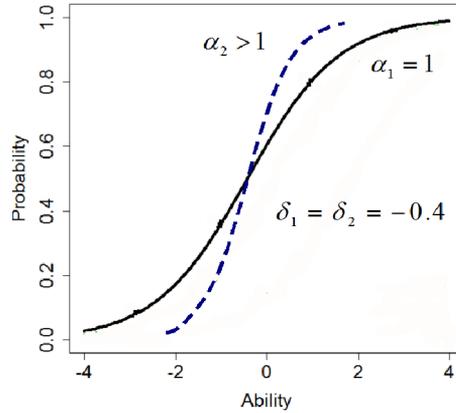


Figura 2. ICC de dos ítems de diferentes niveles de discriminación.

- Modelo Logístico de tres parámetros (3PLM): aparece el parámetro c_i (guessing parameter) que tiene en cuenta la probabilidad de que el ítem haya sido respondido al azar. De esta manera, aún siendo bajo el nivel de habilidad de un individuo, existirá una probabilidad mayor que cero de que responda correctamente el ítem.

$$p = c_i + (1 - c_i) \frac{\exp[\alpha_i(\theta - \delta_i)]}{1 + \exp[\alpha_i(\theta - \delta_i)]} \quad (6)$$

2.2 Curvas de información

En la IRT se pretende estimar el nivel de habilidad de cada examinado (Baker, 2001). La cantidad de información que disponemos se puede calcular como la inversa de la desviación estándar de la estimación del parámetro de habilidad σ :

$$I = \frac{1}{\sigma^2} \quad (7)$$

Si la cantidad de información es grande entonces los valores de habilidad estimados serán similares a los valores reales. Por el contrario, si la cantidad de información es pequeña entonces habrá una gran dispersión en las estimaciones de habilidad.

La curva de información de un ítem (IIC) en general es una función que tiene un máximo en algún nivel de habilidad. Ese valor para el cual la información es máxima será el centro de un intervalo donde la estimación es precisa.

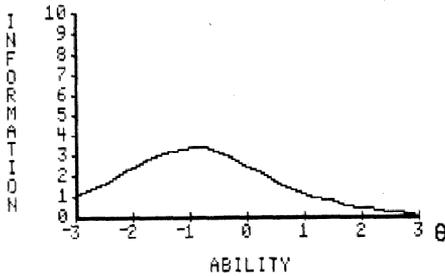


Figura 3. Función de información de un ítem (Baker, 2001).

Para cada ítem o reactivo se puede obtener una curva de este tipo, donde el máximo será muy bajo porque se usa sólo un ítem para obtener la curva.

Como los ítems son parte de un examen, se obtiene información del test a un nivel de habilidad determinado sumando la información de todos los ítems, y la correspondiente curva de la función de información del test TIF, como se muestra en la Fig. 4.

$$I(\theta) = \sum_{i=1}^N I_i(\theta) \quad (8)$$

La forma ideal de la curva de información del test depende de la intencionalidad del mismo. Para un examen de propósito general se buscará una recta horizontal constante, a un nivel muy alto de información. Si la intención es seleccionar candidatos por habilidad, el punto donde se presenta la máxima información tendría que estar cerca del nivel de habilidad de corte (Baker, 2001).

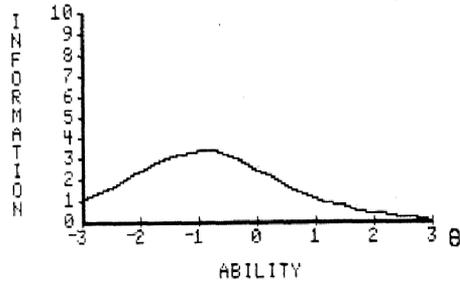


Figura 4. Función de información del test (Baker, 2001).

3. Lenguaje R y Paquete LTM

El lenguaje de programación R (R Core Team, 2013) es la implementación open source del software estadístico S, distribuido en forma gratuita bajo licencia GPL (General Public License) del proyecto de software libre GNU. Permite definir funciones nuevas a partir de aquellas que trae el programa, las que pueden agruparse en lo que se llaman paquetes.

En este trabajo se utilizó el paquete ltm (Rizopoulos, 2006), que permite estimar los parámetros de los modelos estadísticos descriptos.

Las técnicas de estimación asumen que los individuos son independientes entre sí y que los reactivos funcionan de la misma manera para todos los individuos, es decir, no existen factores de diferenciación en la capacidad de respuesta de los participantes.

De las cuatro técnicas existentes para la estimación de los parámetros de los modelos de IRT (joint maximum likelihood, conditional maximum likelihood, marginal maximum likelihood, y Bayesian) (Johnson, 2007) el paquete ltm utiliza la Marginal Maximum Likelihood Estimation (Rizopoulos, 2006).

Los parámetros de los modelos 1PLM, 2PLM y 3PLM se obtienen con las funciones `rasch()`, `ltm()` y `tpm()` respectivamente. En el caso del modelo de Rasch, también se utiliza `rasch()`

pero restringiendo en el argumento de la función el valor del parámetro de discriminación a 1.

Para cualquiera de los cuatro modelos, con la función `factor.scores()` se accede al parámetro de habilidad de los individuos.

El paquete también dispone de la función `plot()` que permite graficar las curvas características de los ítems, las curvas de información del ítem y del test.

La función `anova()` permite decidir, entre dos modelos, cuál ajusta mejor los datos experimentales, realizando el test de razón de probabilidad (LRT). La misma función `anova()` devuelve los valores BIC y AIC, correspondientes al criterio de información bayesiano y al criterio de información de Akaike respectivamente. En ambos casos, cuanto menor es el valor obtenido, mejor resulta el modelo.

4. Metodología

En el presente trabajo se aplican los cuatro modelos descriptos a los ítems del primer examen parcial de Análisis Matemático I de la Facultad de Ingeniería de la UNSa, correspondiente al 1^{er} Cuatrimestre de 2013. El mismo consistió de 14 reactivos del tipo elección múltiple (5 respuestas posibles para cada ítem). La cantidad de alumnos examinados fue de 715 (448 alumnos ingresantes y 267 recursantes).

Se utilizó el paquete `ltm` con el software R, para estimar los parámetros correspondientes a los cuatro modelos, así como también se obtuvieron las curvas ICC, IIC y TIF de cada uno de ellos, para finalmente decidir cuál de ellos ajusta mejor los resultados experimentales.

5. Resultados

La función `descript()` arroja la siguiente información:

Tabla 1. Proporciones de respuestas correcta e incorrectas para cada ítem.

	Incorrecta	Correcta	logit
X1	0.47	0.53	0.11
X2	0.41	0.59	0.36
X3	0.67	0.33	-0.70
X4	0.83	0.17	-1.57
X5	0.65	0.35	-0.64
X6	0.31	0.69	0.78
X7	0.55	0.45	-0.18
X8	0.62	0.38	-0.51
X9	0.81	0.19	-1.43
X10	0.51	0.49	-0.05
X11	0.71	0.29	-0.88
X12	0.53	0.47	-0.11
X13	0.94	0.06	-2.68
X14	0.40	0.60	0.41

Cada ítem se identifica con el prefijo X, seguido del número de ejercicio.

De la Tabla 2 se desprende que 389 alumnos respondieron incorrectamente menos de 6 preguntas, cantidad mínima exigida para aprobar el examen.

Tabla 2. Frecuencias de puntaje total

Total de ejercicios correctos	Frecuencia	Frecuencia acumulada
0	7	7
1	24	31
2	57	88
3	89	177
4	94	271
5	118	389
6	82	471
7	68	539
8	49	588
9	58	646
10	35	681
11	19	700
12	8	708
13	6	714
14	1	715

Tabla 3. Coeficiente de correlación biserial puntual de cada ítem con el puntaje total.

Ejercicio	r_{phi}
X1	0.465
X2	0.505
X3	0.306
X4	0.487
X5	0.335
X6	0.454
X7	0.405
X8	0.547
X9	0.269
X10	0.503
X11	0.424
X12	0.546
X13	0.424
X14	0.360

5.1 Estimación de parámetros

En las Tablas 4 y 5 se presentan los parámetros estimados para cada ítem según los diferentes modelos analizados.

Tabla 4. Parámetro δ en modelos Rasch y 1PLM.

Ítem	Rasch	1PLM
X1	-0.135	-0.153
X2	-0.431	-0.488
X3	0.819	0.928
X4	1.834	2.08
X5	0.753	0.853
X6	-0.932	-1.055
X7	0.211	0.24
X8	0.595	0.675
X9	1.673	1.898
X10	0.058	0.066
X11	1.033	1.171
X12	0.131	0.149
X13	3.053	3.469
X14	-0.493	-0.558

En el modelo de Rasch, el parámetro de discriminación α de todos los ítems fue 1, mientras que el estimado al usar el modelo 1PLM resultó igual a 0.8629.

Tabla 5. Parámetros para los modelos 2PLM y 3PLM.

	2PLM		3PLM		
	δ	α	δ	α	c
X1	-0.150	0.865	-0.143	0.885	0
X2	-0.405	1.128	0.140	1.681	0.236
X3	1.906	0.377	1.984	1.753	0.274
X4	1.369	1.661	1.386	1.621	0
X5	1.620	0.410	1.765	2.040	0.280
X6	-0.984	0.948	-0.958	0.978	0
X7	0.283	0.712	0.885	1.188	0.215
X8	0.502	1.337	0.687	1.801	0.095
X9	3.927	0.375	2.317	2.043	0.159
X10	0.056	1.084	0.063	1.113	0
X11	1.241	0.803	1.403	1.586	0.147
X12	0.108	1.354	0.306	1.700	0.095
X13	1.923	2.355	1.855	2.526	0
X14	-0.770	0.576	-0.750	0.589	0

5.2 Comparación de modelos mediante anova()

Se utilizó la función `anova()` para decidir qué modelo ajusta mejor los datos. Las tablas 6 a 11 muestran los resultados obtenidos al comparar los modelos de a pares, siempre considerando como hipótesis nula que aquel que mejor ajusta los datos es el de menor número de parámetros. Evaluando el valor de LRT (Likelihood ratio test) y el valor de p.values, se puede descartar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa.

Tabla 6. Comparación Rasch vs. 1PLM.

Modelo	AIC	BIC	LRT	p.values
Rasch	11636.67	11700.68		
1PLM	11627.50	11696.08	11.18	0.001

Tabla 7. Comparación Rasch vs. 2PLM.

Modelo	AIC	BIC	LRT	p.values
Rasch	11636.67	11700.68		
2PLM	11519.29	11647.31	145.38	<0.001

Tabla 8. Comparación Rasch vs. 3PLM.

Modelo	AIC	BIC	LRT	p.values
Rasch	11636.67	11700.68		
3PLM	11524.59	11716.62	168.09	<0.001

Tabla 9. Comparación 1PLM vs. 2PLM.

Modelo	AIC	BIC	LRT	p.values
1PLM	11627.50	11696.08		
2PLM	11519.29	11647.31	134.21	<0.001

Tabla 10. Comparación 1PLM vs. 3PLM.

Modelo	AIC	BIC	LRT	p.values
1PLM	11627.50	11696.08		
3PLM	11524.59	11716.62	156.91	<0.001

Tabla 11. Comparación 2PLM vs. 3PLM.

Modelo	AIC	BIC	LRT	p.values
2PLM	11519.29	11647.31		
3PLM	11524.59	11716.62	22.7	0.065

5.3 Comparación de modelos mediante margins()

Se utilizó la función `margins()` para obtener los valores residuales de chi-cuadrado en la tablas de contingencia de 2x2 para todos los ejercicios tomados de a pares. Así se tienen cuatro tablas por modelo: (0,0), (0,1) (1,0) y (1,1).

Se acepta como máximo valor residual a 3.5. Es así como el modelo de Rasch arroja hasta doce pares de ejercicios con problemas, el modelo 1PLM hasta 7, mientras que los modelos 2PLM y 3PLM sólo un par en una de las tablas.

5.4 Curvas características y de información

Las figuras 5 a 16 muestran las curvas características de ítem (ICC), las curvas de información del ítem (IIC) y las funciones de información del test (TIF) de los cuatro modelos. Se presentan sólo las ICC de tres ítems, para dar claridad a los gráficos, y a los efectos de apre-

ciar la diferencia en los valores de los parámetros de esos ítems.

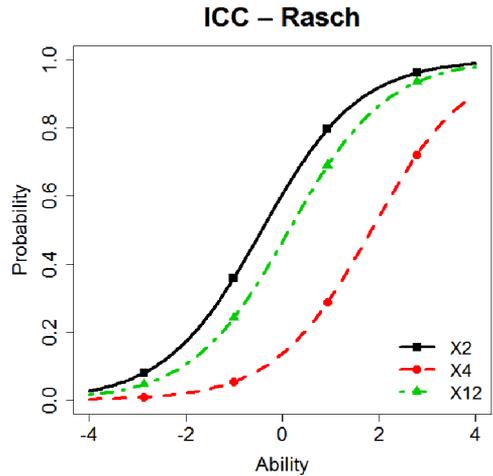


Figura 5. Curvas características de tres ítems según modelo de Rasch.

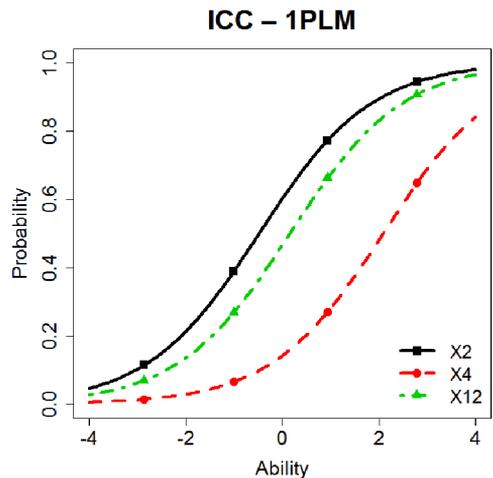


Figura 6. Curvas características de tres ítems según 1PLM.

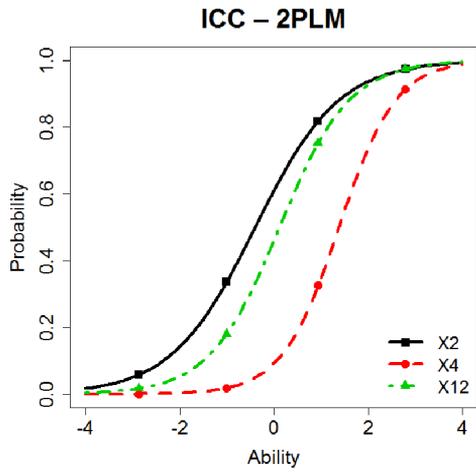


Figura 7. Curvas características de tres ítems según 2PLM.

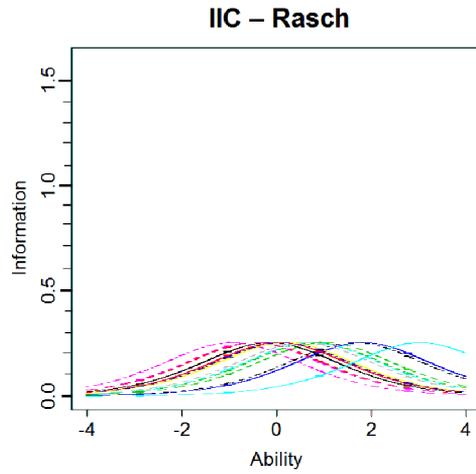


Figura 9. Curvas de información de ítems según modelo de Rasch.

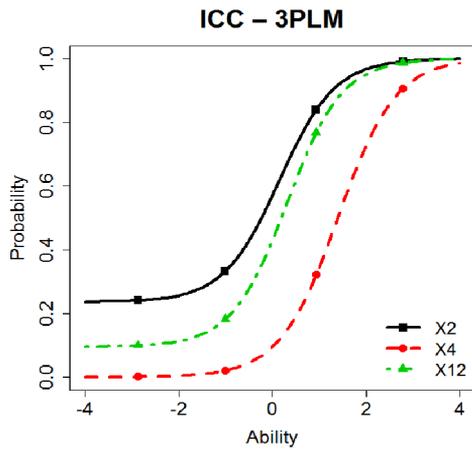


Figura 8. Curvas características de tres ítems según 3PLM.

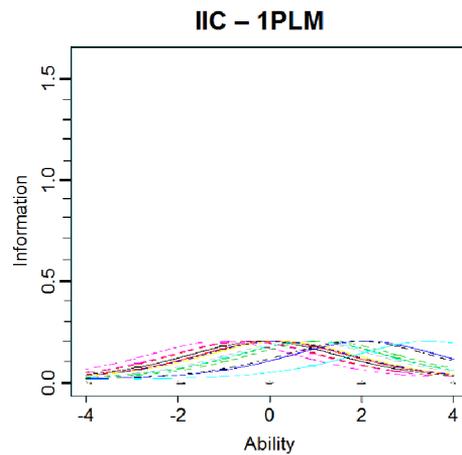


Figura 10. Curvas de información de ítems según 1PLM.

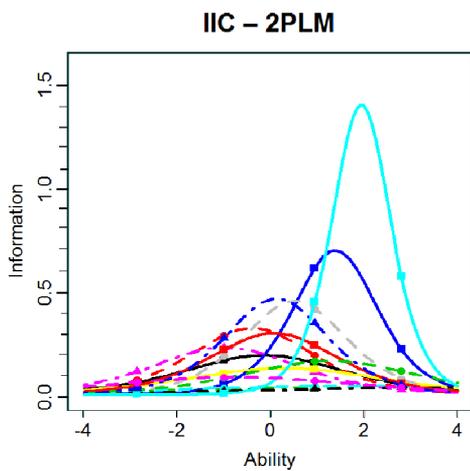


Figura 11. Curvas de información de ítems según 2PLM.

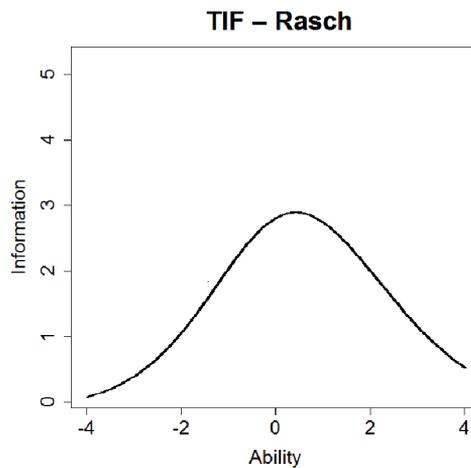


Figura 13. Función de información del test según modelo de Rasch.

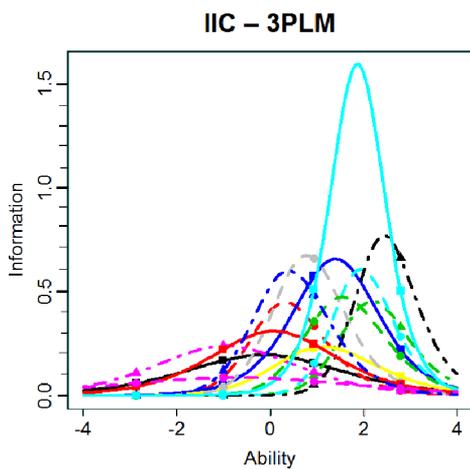


Figura 12. Curvas de información de ítems según 3PLM.

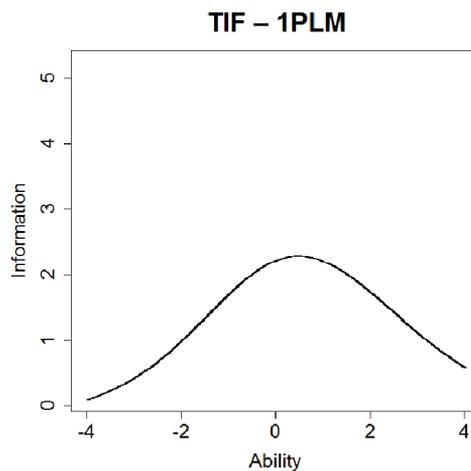


Figura 14. Función de información del test según 1PLM.

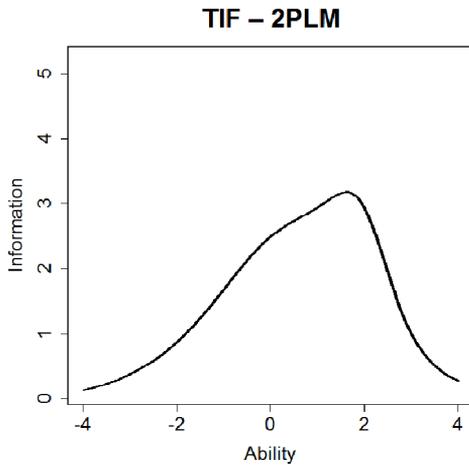


Figura 15. Función de información del test según 2PLM.

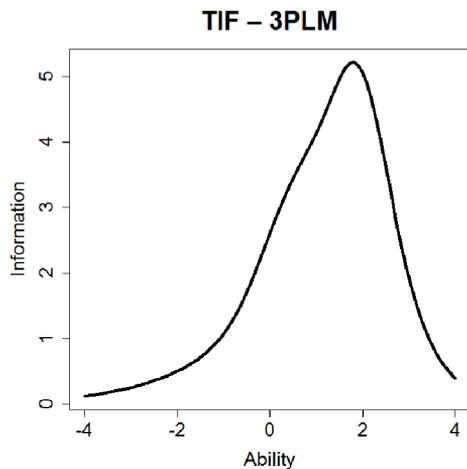


Figura 16. Función de información del test según 3PLM

6. Análisis y discusión

En la Tabla 3 se observa que los coeficientes de correlación biserial puntual de cada ítem con el puntaje total no son iguales. Cuanto más alto es el valor de r_{pbi} , mayor será la discriminación del ítem (Brown, 2001). De esta manera, no se cumpliría el supuesto de los modelos de Rasch y

1PLM de considerar todos los reactivos con igual nivel de discriminación.

Los valores de dificultad de cada ítem son similares para Rasch y para 1PLM, al igual que el parámetro de discriminación común a todos los ítems, $\alpha = 1$ y $\alpha = 0.863$ respectivamente. Según estos modelos el ítem de menor dificultad es el número 6, mientras el de mayor dificultad es el número 13, coincidiendo con lo presentado en Tabla 1.

La IRT se focaliza en los ítems y no en la calificación total del examen para medir la habilidad que posee un examinado. En el caso analizado, con los modelos de Rasch y 1PLM, el nivel de habilidad de un alumno que aprobó el examen (con 6 o más ejercicios correctos) es de $\theta \geq 0.14$. Mientras que con los modelos de 2PLM y 3PLM, si se quisiera establecer una relación directa entre un puntaje mínimo y habilidad, no se podría hacer. Así es como en 2PLM se tienen individuos con habilidad $\theta = 0.41$ con 5 respuestas correctas, que no aprobarían el examen, y otros con menor habilidad ($\theta = -0.424$) que sí lo harían al tener 6 respuestas correctas. Esto es debido a que el nivel de habilidad estimada al usar estos dos modelos, no depende de la cantidad de respuestas correctas, sino que también influye cuáles fueron los ítems respondidos correctamente.

Los modelos 2PLM y 3PLM indican que el ejercicio de mayor dificultad es el número 9. Esto en principio no coincide con lo indicado en la Tabla 1, pero hay que tener en cuenta que el nivel de discriminación del ítem 13 en ambos modelos es superior al correspondiente al ítem 9. De ahí, si bien su dificultad es menor resulta un reactivo que discrimina más a los alumnos que pueden responderlo bien de aquellos con menor habilidad.

En la Tabla 5 se observa que el parámetro de respuesta al azar es en general bajo, pero en

algunos casos superior al máximo esperado en ejercicios de respuestas múltiples con 5 opciones ($c_{\max} = 0.2$).

El modelo que menor error de medición presenta es el 3PLM, seguido por el modelo 2PLM, y los menos precisos son los de Rasch y 1PLM. Esto concuerda parcialmente con lo informado por Moghadamzadeh et al (2011), quienes encontraron que el modelo que brinda la mayor cantidad de información es el 2PLM, pero próximo al 3PLM. En las Fig. 9 a 12 se aprecia que la cantidad de información por ítem es mucho menor en los modelos Rasch y 1PLM. En las Fig. 13 y 14 se observa que la cantidad de información se distribuye en forma casi simétrica alrededor de un valor de habilidad $\theta = 0.5$, mientras que las Fig. 15 y 16 muestran que si bien el valor máximo de la función se presenta para valores elevados de habilidad $\theta \approx 2$, siendo más precisas las mediciones en esa zona, para $\theta \geq 0$ los valores de esta función superan el valor 2 (máximo alcanzado en el modelo 1PLM).

Las Tablas 6 a 11 muestran, en base a los valores AIC y BIC (cuanto menores, mejor es el modelo), y LRT (si es alto se descarta la hipótesis nula) que los modelos que mejor ajustan los datos son los modelos 2PLM y 3PLM, inclusive sin lograrse una definición contundente entre estos dos últimos (Tabla 11). Sin embargo, a pesar de que las mediciones son más precisas con el modelo 3PLM, el hecho de obtenerse en algunos casos valores de $c > c_{\max}$ indicaría que el mejor modelo es el 2PLM.

El paquete ltm resulta fácil de usar, brindando muchas herramientas para el análisis de la información, tanto en forma gráfica (Fig. 5 a Fig. 16) como analítica.

7. Conclusiones

- El modelo de IRT que mejor ajusta los datos analizados es el modelo logístico de dos parámetros.
- El paquete ltm es muy potente, versátil y fácil de utilizar, brindando la posibilidad de acceder a toda la información necesaria para determinar los niveles de habilidad de los examinados, y los parámetros de varias distribuciones estadísticas de IRT.
- Resulta interesante ahondar en otros aspectos no analizados, entre ellos la medición de las habilidades de los estudiantes y el seguimiento del proceso de aprendizaje.
- Se pueden conformar bancos de reactivos, conociendo sus niveles de discriminación y dificultad, para mejorar los instrumentos evaluativos.
- La IRT podría resultar ser la mejor opción para la evaluación de los alumnos en base a competencias o habilidades desarrolladas.

8. Referencias

- Baker F.B., *The Basics of Item Response Theory*, Carol Boston, Lawrence Rudner, USA, 2001.
- Brown, J.D., Statistics Corner: Questions and answers about language testing statistics: Point-biserial correlation coefficients, *Sbiken: JLT Testing & Evlution SIG Newsletter*, 5 (3), 13 – 17, 2001.
- Johnson, M.S., Marginal Maximum Likelihood Estimation of Item Response Models in R, *Journal of Statistical Software*, Volume 20, Issue 10, 1-24, 2007.
- Moghadamzadeh, A., Salehi, K & Khodaie, E., A Comparison the Information Functions of the Item and Test in One, Two and Three

- Parametric Model of the Item Response Theory (IRT), International Conference on Education and Educational Psychology (ICEEPSY 2011), *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 29, 1359 – 1367, 2011
- R. Core Team, R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Austria, 2013.
- Rizopoulos, D., ltm: An R package for Latent Variable Modelling and Item Response Theory Analyses, *Journal of Statistical Software*, 17 (5), 1-25, 2006.
- Rizopoulos, D., Item Response Theory Using the ltm Package, *The R User Conference 2008*, Technische Universität Dortmund, August 14th, 2008.
- Rizopoulos, D., Item Response Theory in R using Package ltm, *Seminar WU Wirtschaftsuniversität*, Erasmus University Medical Center, the Netherlands, Department of Statistics and Mathematics, Wien, January 12th, 2010.
- Wu, M. & R. Adams, *Applying the Rasch model to psycho-social measurement: A practical approach*, Educational Measurement Solutions, Australia, 2007.

Estudios estructurales y magnéticos de la aleación nanocrystalina $\text{Fe}_{81-x}\text{Si}_x\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ de bajo costo¹

Soledad Gamarra Caramella², Leonardo Marta², Carlos Berejnoi³ & Javier A.Moya¹

Resumen

Se sintetizan aleaciones metálicas en forma de cintas de composición $\text{Fe}_{81-x}\text{Si}_x\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ ($x=2, 6$) a partir de materiales comerciales de baja pureza. El contenido de impurezas, favorece la cristalización de la aleación con $x=2$; con $x=6$ es posible obtener cintas amorfas. Se realizan tratamientos térmicos por efecto Joule a fin de promover la nanocrystalización del material. Se monitorea la resistencia eléctrica de la cinta durante la ejecución de los tratamientos térmicos, observando la variación estructural del material con el objeto de determinar la potencia necesaria para el recocido óptimo en relación a la permeabilidad magnética de la aleación con $x=6$. Las buenas propiedades obtenidas y la alta disponibilidad de la materia prima utilizada incentiva un mayor estudio de estas aleaciones.

Palabras clave: materiales magnéticos blandos-metales nanocrystalinos-permeabilidad magnética

1. Introducción

1.1 Aleaciones metálicas amorfas y nanocrystalinas

Las aleaciones metálicas amorfas, descubiertas en 1960, son aleaciones que conservan la estructura amorfa en el estado sólido propia del estado líquido, es decir, durante su proceso de solidificación no se produce cristalización.

Este efecto se logra, en primera instancia, partiendo de una composición química que contenga cantidades apropiadas de ciertos elementos que obstaculizan la cristalización, llamados amorfizantes, como ser fósforo (P), boro (B), silicio (Si), carbono (C). Asimismo, es necesario

alcanzar velocidades de enfriamiento muy elevadas, a fin de impedir el movimiento de los átomos durante el paso al estado sólido.

Estos materiales, utilizados fundamentalmente como núcleos de transformadores y en sensores, presentan muy buenas propiedades magnéticas blandas, como ser, una alta imanación de saturación y alta permeabilidad magnética. Sin embargo, las aleaciones base Fe poseen una importante magnetostricción ($\lambda \approx 20 \cdot 10^{-6}$) que afecta las propiedades blandas y, al intentar disminuirla

-
1. IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA, Santiago del Estero, octubre de 2013. Publicado en CD, ISSN 1853-7871
 2. Grupo Interdisciplinario en Materiales-IESIING, Fac. de Ingeniería, UCaSal, INTECIN UBA-CONICET.
 3. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta.

a valores cercanos a cero, se produce una significativa pérdida de la imanación de saturación.

Nuevos materiales, descubiertos por investigadores de la Hitachi Metals (Yoshizawa et al., 1988), permitieron solucionar este problema. Se trata de materiales nanocristalizados por medio de tratamientos térmicos controlados a partir de la aleación amorfa, obtenida con una composición que induzca a la nanocristalización. Se atribuye la capacidad de nanocristalizar a la presencia de elementos que impidan el crecimiento de los granos, como Nb, Mo, Zr, etc. y favorezcan la nucleación de α -Fe, como el Cu (Yoshizawa et al., 1988).

Debido a un balance entre la magnetostricción positiva de la matriz amorfa y el valor negativo de los nanocristales, estos materiales presentan una magnetostricción casi nula. Mejoran asimismo la imanación de saturación de su precursor amorfo y presentan muy baja fuerza coercitiva.

A partir de entonces, se han desarrollado diferentes aleaciones conteniendo elementos de transición temprana, para favorecer, como se ha mencionado, la nanocristalización. Sin embargo, recientemente se produjeron nuevos materiales magnéticos blandos nanocristalinos de composición Fe-Si-B-P-Cu (Makino et al., 2009). Estas aleaciones presentan un alto contenido de Fe, lo que, juntamente con la ausencia de elementos de transición, favorece una alta imanación de saturación (cercana a la obtenida con materiales tradicionales de FeSi de grano orientado), disminuyendo los costos del material.

A su vez tienen valores de campos coercitivos menores que los materiales tradicionales, con una consecuente importante disminución de las pérdidas en frecuencia. Como una ventaja económica adicional, se encuentran algunos reportes de la producción de estos materiales a partir de elementos o ferroaleaciones de origen comercial (Zhang et al., 2012; Urata et al., 2010).

En el presente trabajo se sintetizan cintas de composición $\text{Fe}_{87-x}\text{Si}_x\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ ($x=2, 6$) a partir de materias primas de baja pureza, a fin de estudiar la capacidad de amorfización y sus propiedades magnéticas en relación a aquellas obtenidas con materiales de pureza de laboratorio (99.9%). Con los materiales comerciales es posible obtener buenas características magnéticas blandas con bajos costos de producción. Asimismo, los elementos puros resultan más difíciles de conseguir debido a que son importados.

2. Experimental

2.1 Síntesis del material

Las aleaciones se prepararon en un horno de inducción en atmósfera de Ar. Se utilizaron como materias primas hierro de construcción con un contenido de C de 0.06% másico y pureza 99.5% másico, Cu electrolítico y las siguientes ferroaleaciones industriales: Fe-Si, pureza 97.9; Fe-B, pureza 99.2; Fe-P, pureza 91.5 (% másicos). La composición química, rica en Fe, se ajustó empleando hierro de construcción. Estos materiales presentan todas purzas inferiores a las reportadas por Zhang et al. (2012) y Urata et al. (2010). En algunos casos la diferencia alcanza un 8%.

Debido al elevado contenido de impurezas de las materias primas utilizadas, se sintetizaron dos aleaciones de composición $\text{Fe}_{87-x}\text{Si}_x\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ ($x=2, 6$), teniendo en cuenta que el contenido de Si favorece la estabilidad de la estructura nanocristalina (Zhang et al., 2012).

Las cintas se elaboraron por el método melt-spinning. Este método consiste en la eyección de la aleación fundida sobre una rueda construida con un material de alta conductividad térmica, que gira a una velocidad tangencial de 30 m/seg. De esta forma se alcanzan velocidades de enfriamiento del orden de 10^6 K/s.

Se obtuvieron cintas de distintos espesores, que van desde 15 a 30 μm y anchos de 0.75 mm.

2.2 Métodos empleados

Las muestras fueron caracterizadas por difracción de rayos X (DRX).

Las cintas nanocristalinas se obtuvieron a partir del material amorfo, por medio de tratamientos térmicos. El método utilizado tradicionalmente consiste en someter las cintas a un tratamiento térmico en un horno convencional, por un tiempo determinado y a una dada temperatura. En este trabajo se realizaron recocidos por efecto Joule.

2.2.1 Tratamientos térmicos por efecto Joule

El método de recocido por efecto Joule aprovecha el calor que produce el paso de una corriente eléctrica por la sección de la muestra.

Las cintas recocidas con este método muestran mayor ductilidad que aquellas que fueron tratadas en hornos.

La resistencia eléctrica (R) de un material es muy dependiente de la estructura del mismo y, por lo tanto, monitoreando su valor durante la ejecución de los recocidos se pueden observar las modificaciones estructurales que se producen en las muestras y detener el tratamiento en el punto deseado de transformación.

El equipo utilizado para realizar los tratamientos térmicos se desarrolló con instrumentación virtual (IV) en nuestro laboratorio.

2.2.2 Mediciones de permeabilidad en frecuencia

Una de las principales propiedades que caracteriza a los materiales magnéticos blandos es la permeabilidad magnética y su comportamiento en frecuencia.

El sistema utilizado para determinar la permeabilidad, consiste en un bobinado primario, a través del cual se aplica un pequeño campo magnético alterno ($H_{ac} = 0.5 \text{ A/m}$), y una bobina sensora (bobinado secundario) dispuesta en el interior del bobinado primario y colineal al mismo. La muestra se coloca como núcleo en la bobina sensora y se lee la señal proveniente de la misma cuando actúa el campo H_{ac} que se relaciona con la permeabilidad por medio de la ecuación 1.

$$\mu = \frac{V}{N_2 \cdot S_2 \cdot \omega \cdot H_{ac} \cdot \mu_0} \quad (1)$$

Donde N_2 y S_2 son el número de vueltas del secundario y la sección del mismo; ω es la frecuencia de la corriente; H_{ac} el campo aplicado y μ_0 la permeabilidad del vacío. Las frecuencias evaluadas van desde los 30 kHz hasta los 5 Mhz.

3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades estructurales

En la Fig. 1 se muestra el espectro de DRX de la aleación $Fe_{87-x}Si_xB_8P_4Cu_1$ con $x=2$ sin tratamiento térmico (*as-quenched*). Puede observarse que presenta una estructura cristalina, formada claramente por granos de $\alpha\text{-Fe(Si)}$ y boruros.

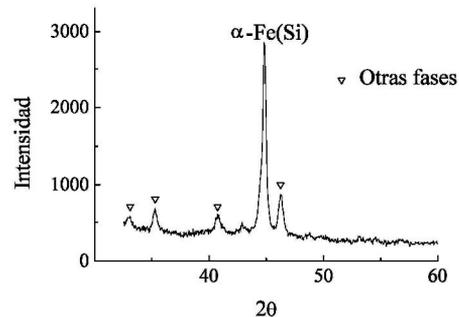


Figura 1. DRX de la aleación cristalina $Fe_{85}Si_2B_8P_4Cu_1$.

La cristalización de esta muestra se atribuye a un efecto desestabilizante de la estructura amorfa por parte de la mayor proporción de impurezas presentes en las materias primas en relación a los trabajos mencionados de otros autores.

En la Fig. 2 se muestran los espectros de la aleación $\text{Fe}_{81}\text{Si}_6\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$, sin tratamiento térmico y con un recocido hasta una potencia de 3W.

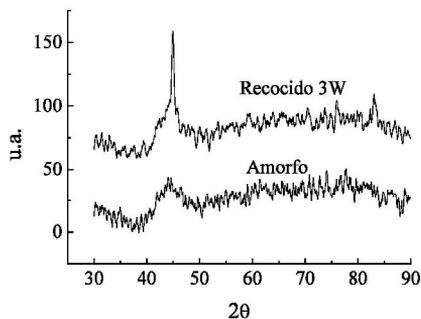


Figura 2. DRX aleación $\text{Fe}_{81}\text{Si}_6\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$.

Puede observarse que la muestra sin recocido presenta un halo centrado alrededor de los 45° , característico de la aleación amorfa. Sin embargo, al realizar un pequeño recocido se observan los picos correspondientes a los planos (1 1 0) y (3 2 1) del α -Fe(Si) en 2θ de 44.93° y 83.12° .

El tamaño de grano (D) se estima utilizando la fórmula de Scherrer a partir del ancho a la altura media del pico de difracción del plano (1 1 0), en el caso de las aleaciones con $x=2$. Para $x=6$ (recocida a 3W) se realiza un promedio del D encontrado para los picos (1 1 0) y (3 2 1). Asimismo, la posición del pico permite inferir el parámetro de red (a), mediante el cual es posible determinar la composición química de los nanogranos.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades obtenidas a partir de los difractogramas para las cintas de $\text{Fe}_{85}\text{Si}_2\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ sin recocer y $\text{Fe}_{81}\text{Si}_6\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ recocida.

Tabla 1. Propiedades de los nanogranos.

Cintas	a [°Å]	D [nm]	Comp. [%at de Si]
$\text{Fe}_{85}\text{Si}_2\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$	2.856	29.76	8.43
$\text{Fe}_{81}\text{Si}_6\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$	2.847	18.75	12.56

Como puede observarse, la cinta que cristaliza durante el proceso de *melt-spinning* presenta menor porcentaje de Si en los granos, debido al escaso tiempo de difusión del elemento durante el proceso de enfriamiento rápido (velocidad de enfriamiento: 10^6 K/seg). Esto se encuentra de acuerdo con lo observado por Zhang et al. (2012) en muestras de $\text{Fe}_{85.2}\text{Si}_2\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_{0.8}$ que, sometidas a un tratamiento térmico óptimo, presentan granos de α -Fe(Si) con una composición de Si de 15%at.

Por otra parte, es importante notar que el tamaño de los cristales de las cintas con $x=2$ es mayor al obtenido en las cintas que nanocristalizaron con el tratamiento térmico ($x=6$). Esto se debe a que en el caso de $x=2$, el grano crece directamente durante la colada, mientras que en las cintas con $x=6$ el crecimiento se produce durante el tratamiento térmico controlado, a partir de clusters que se forman en la colada (Makino, 2012).

En el caso de la cinta recocida (composición $\text{Fe}_{81}\text{Si}_6\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$), al observar el espectro de DRX resulta evidente que no se trata de un recocido en condiciones óptimas ya que un halo del material amorfo continúa presente alrededor de los 45° . Con recocidos a mayores potencias se deberían obtener granos con una concentración de Si mayor.

3.2 Monitoreo de resistencia eléctrica

Los tratamientos térmicos por efecto Joule fueron realizados con un incremento progresivo de la corriente con el tiempo, utilizando un $\Delta I = 10$ mA y un $\Delta t = 12$ seg.

En la Fig. 3 se muestra la variación de la resistencia eléctrica de una cinta de composición $Fe_{81}Si_6B_8P_4Cu_1$ en función de la potencia aplicada. El tratamiento, en este caso, consiste en el monitoreo de la resistencia eléctrica durante el aumento de la corriente hasta la cristalización total del material, a fin de observar los cambios estructurales en la muestra.

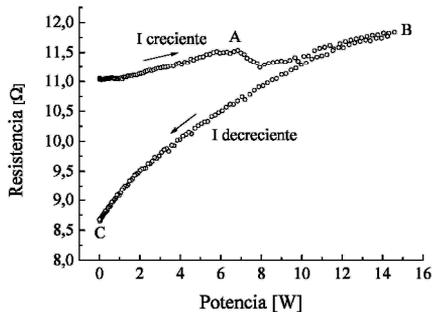


Figura 3. Curva de resistencia vs potencia aplicada, cinta $x=6$.

En la curva, pueden distinguirse diferentes zonas. Inicialmente, la resistencia del material amorfo crece monótonamente con la potencia aplicada. A partir del punto A la pendiente cambia de signo, debido a la nanocrystalización de α -Fe(Si) (el material se vuelve menos resistivo). La curva alcanza un mínimo, a partir del cual crece nuevamente con otra pendiente. Alrededor de una potencia de 10 W se observa una inestabilidad, atribuida a la cristalización de boruros. No se observan otros cambios hasta el final de nuestro recocido.

Seguidamente se procede a disminuir la potencia, observándose una caída monótona de la resistencia ($\Delta R/R=22\%$ a temperatura ambiente) mostrando la irreversibilidad de los cambios producidos.

Cuando vuelve a hacerse pasar corriente por el material recocido, la resistencia se mueve por

la curva que va de C a B, tanto al incrementar como al reducir la potencia. Esto implica que, luego del primer recocido, la muestra no sufre nuevos cambios estructurales.

3.3 Tratamientos térmicos y propiedades magnéticas

Se realizaron recocidos de cintas de la aleación amorfa $Fe_{81}Si_6B_8P_4Cu_1$ hasta alcanzar diferentes valores de potencias.

Posteriormente, se midió la permeabilidad inicial en frecuencia de las muestras sometidas a estos recocidos, a fin de buscar el tratamiento térmico óptimo.

Puede observarse que existe un tratamiento para el cual la permeabilidad es máxima, a 8,9 W, y que ésta cae de manera pronunciada al aumentar 1 W en la potencia del recocido.

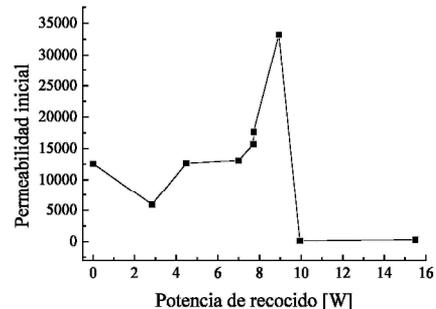


Figura 4. Permeabilidad inicial a 100 kHz en función de la potencia aplicada en el recocido, cinta $x=6$.

El valor obtenido para la permeabilidad máxima a 100 kHz, igual a 33000, está en concordancia con el valor de 36000 a 1 kHz para una aleación de composición $Fe_{84,3}Si_4B_8P_3Cu_{0,7}$, reportado por Kubota (2011).

Asimismo, este autor obtiene una resistividad $\rho=0.827 \mu\Omega m$ para dicha aleación. El valor de nuestra aleación $Fe_{81}Si_6B_8P_4Cu_1$, con mayor cantidad de Si, lo que aumenta la resistividad y afecta la respuesta en frecuencia de la per-

meabilidad, es de aproximadamente $\rho=1.6\mu\Omega\text{m}$.

En la Fig. 5 se muestra la respuesta de la permeabilidad inicial en frecuencia de la muestra sin recocido y con un recocido óptimo (8.9 W).

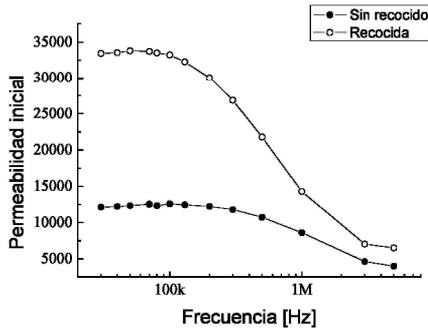


Figura 5. Permeabilidad en frecuencia de cinta con $x=6$ amorfa y recocida.

4. Conclusiones

Se sintetizaron aleaciones nanocristalinas que se reportan con valores de alta imanación de saturación, semejantes a la de los materiales cristalinos comerciales, y de bajas pérdidas en frecuencia. Las aleaciones producidas tienen la composición $\text{Fe}_{87-x}\text{Si}_x\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ ($x=2, 6$). Se utilizaron materias primas que presentan purzas inferiores (hasta en un 8%) a las reportadas por otros autores, lo que disminuye los costos de producción de estos materiales.

Se observa que el alto contenido de impurezas, favorece la cristalización de la aleación con $x=2$, mientras que con $x=6$ se obtienen cintas amorfas.

Por medio de mediciones de resistencia, se observa la variación estructural del material (amorfo inicialmente) al realizar tratamientos térmicos por efecto Joule, detectándose el comienzo de la nanocristalización de $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$.

Se encuentra, asimismo, que el recocido óptimo para la aleación, a fin de obtener la permeabilidad inicial máxima ($\mu_{i(100\text{kHz})}=33000$), debe realizarse hacia los 8.9 W.

Los bajos costos y la disponibilidad de los materiales utilizados justifica la pequeña disminución en capacidad de amorfización y propiedades magnéticas de las cintas obtenidas.

5. Referencias

- Kubota, T., A. Makino & A. Inoue, Low core loss of $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{2}\text{B}_{8}\text{P}_{4}\text{Cu}_{1}$ nanocrystalline alloys with high Bs and B800, *Journal of Alloys and Compounds*, 509S, S416-S419, 2011.
- Makino, A., H. Men, T. Kubota, K. Yubuta & A. Inoue, FeSiBPCu nanocrystalline soft magnetic alloys with high Bs of 1.9 Tesla produced by crystallizing heteroamorphous phase, *Materials Transactions*, 50, pp.204–209, 2009.
- Makino, A., Nanocrystalline soft magnetic Fe-Si-B-P-Cu alloys with high B of 1.8-1.9 T contributable to energy saving, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48, 1331-1335, 2012.
- Urata, A., H. Matsumoto, S. Yoshida & A. Makino, High Bs FeSiBPCu nanocrystalline wide ribbons using industrial raw materials, *Materials Science Forum*, 654-656, 1102-1105, 2010.
- Yoshizawa, Y., S. Oguma & K. Yamauchi, New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure, *Journal of Applied Physics*, 64, 6044–6046, 1988.
- Zhang, Z., P. Sharma & A. Makino, Role of Si in high Bs and low core-loss $\text{Fe}_{85.2}\text{B}_{10-x}\text{P}_4\text{Cu}_{0.8}\text{Si}_x$ nano-crystalline alloys, *Journal of Applied Physics*, 112, 103902-1-8, 2012.

On the variational derivation of boundary value problems in the dynamics of structural elements

Ricardo Oscar Grossi

Summary

The calculus of variations is an old branch of mathematical analysis concerned with the problem of extremizing functionals, a generalization of the problem of finding extremes of functions of several variables. This discipline has a long history of interaction with other fields of mathematics and physics, particularly with mechanics. Engineers and applied mathematicians have increasingly used the techniques of calculus of variations to solve a large number of problems. Nevertheless, in this discipline the «operator» δ has been assigned special properties and handled using heuristic procedures. A mechanical « δ -method» has been developed and extensively used, as can be observed in the current engineering literature.

The objective of this paper is to present a rigorous formalism for the determination of boundary value problems which describe the static or dynamic behavior of structural elements. A discussion about the shortcomings of the use of the vague mechanical δ -method is presented.

Keywords: Variational calculus-rigorous formalism- functional-admissible directions

1. Introduction

The calculus of variations is a branch of mathematics concerned with extreme values in certain function spaces. It determines necessary conditions for a class of functions in order to extremize a given functional. These conditions are formulated in terms of ordinary differential equation or partial differential equations, boundary conditions and transition conditions. For centuries scientists have tried to formulate

laws of natural sciences as extreme problems and called these laws variational principles. For this reason, in solid mechanics, the principle of virtual work and the Hamilton's principle provide straightforward methods for determining the differential equations of equilibrium and motion, boundary conditions and transition conditions. It is well known that there are two basic approaches to deriving the equations of motion

1. Research Member of CONICET. - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Salta

of a mechanical system. One approach uses Newton's laws through an establishment of all the forces and moments in the system. The other is based on the application of Hamilton's principle. For complicated mechanical systems, the first procedure becomes intractable, and it is difficult to determine the type of boundary conditions and / or transitions conditions to be used in conjunction with the derived differential equations. On the other hand, the variational approach is very straightforward since variations of the kinetic and potential energies are utilized. This is one of the reasons why engineers, physicists and applied mathematicians are increasingly using techniques of calculus of variations to solve a large number of problems. The applications of this discipline now embrace a great variety of fields. The calculus of variations and the optimal control theory are widely used in biology, economics, astronautics, quantum mechanics, finance, etc. Nevertheless, calculus of variations is a discipline in which the «operator» δ has been assigned special properties not analyzed in the rigorous formalism of mathematics and a mechanical « δ -method» has been developed and extensively used.

Diverse opinions regarding the role of applied mathematics have been expressed and one approach is based on the use of pure mathematics with the field of application as an extension occupying a secondary role. Nevertheless, it is obvious that generally, the applied mathematician does not need to know concepts and theories as much as the pure mathematician does, but he should have good training in basic pure mathematics and should know the foundations of the relevant mathematical tools he is using in the solution of his problems, which have often emerged from real-world situations. It is not true that the mathematical theory needed

by applied mathematicians is remote from the urgent problems that arise in various fields of engineering and applied science. Professor Richard Courant [1] remarked: «Pure mathematicians sometimes are satisfied with showing that the non-existence of a solution implies a logical contradiction, while engineers might consider a numerical result as the only reasonable goal. Such one sided views seem to reflect human limitation rather than objective values. In itself mathematics is an indivisible organism uniting theoretical contemplation and active application».

In calculus, real valued functions defined on certain subsets of the n -dimensional Euclidean space \mathbb{R}^n , are used. The determination of extreme values of a function $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subseteq \mathbb{R}^n$, is concerned with finding elements of D with which the smallest (largest) value of f is associated. A decisive role in the optimization of this type of functions is played by its partial derivatives or more generally by its directional derivatives. It is commonly accepted that the concept of *functional* is a natural generalization of the concept of function given in elementary calculus. Since the calculus of variations is concerned with the problem of extremizing functionals, it is natural to consider this problem as a generalization of the problem of finding extremes of real valued functions of several variables. While it might seem that the introduction of the concept of *variation* of a functional should be subsumed into the mentioned rigorous procedure, this is not the case. Thus, a number of books and papers have been published dealing with the calculus of variations and particularly with the definition of variation of a functional, from a heuristic point of view. For this purpose, a vague and obscure procedure based on an analogy between the variational operator δ and

the differential operator d of functions is adopted.

It is true that since the calculus of variations has called the attention of several mathematicians, who made important contributions to its development, there are many technical details which are hardly available to a non-mathematician. But fortunately, it is possible to present a minimal set of basic concepts of this discipline, using only certain abstractions of what are considered to be simple ideas from elementary calculus. In this aspect, the elementary functional analysis provides a much better and deeper understanding of the fundamental concepts of: *variation of a functional, space of admissible functions, space of admissible directions, and weak and strong local extremes.*

Professor Magnus Hestenes claimed that «there is no discipline in which more correct results can be obtained by incorrect means than in the calculus of variations», [2]. This dictum of a prestigious specialist emphasizes the importance of the use of rigorous formalisms, rather than obscure heuristic definitions.

The primary purpose of this paper is to make a small contribution toward reducing the gap between the abundance of concepts and methods available in abstract calculus of variations and their limited use in various areas of vibrations of structures. For this purpose, a rigorous procedure for the determination of boundary value problems, which describe the statical or dynamical behavior of a common structural element, is discussed.

Substantial literature has been devoted to the formulation - by means of the calculus of variations - of boundary value problems in the statics and dynamics of mechanical systems. It is not the intention to review the literature; consequently, only some of the relevant works will be cited. A number of textbooks, [3-13] deal

with the classical variational calculus and others, [14-24] include rigorous treatments of the theoretical aspects of this discipline. Several textbooks, [25-30] also present formulations, by means of variational techniques, of boundary value problems in the statics and dynamics of beams, frames and plates.

A secondary purpose of this paper is to present a rigorous variational formulation to determine the boundary value problems which describe the dynamical behavior of a freely vibrating beam. For this purpose, the construction of the domain and space of admissible directions, which corresponds to the variation of the functional which in mechanics is called *action integral* is included. In addition, the presence of some errors in the literature, and particularly in the formulation of fundamental lemma of the calculus of variations is also demonstrated.

This paper is organized in the following way. In Section 2 some basic concepts are treated. In Section 3 a discussion about the concept of variation of a functional, which covers both the heuristic and the rigorous form, is included. In Section 4 the Hamilton's principle is rigorously stated in the case of a freely vibrating beam. Finally, Section 5 contains the conclusions of this paper.

2. Some basic topics

It is commonly accepted that the concept of functional is a generalization of that of a real function of real variable and the following rigorous definition can be found even in engineering textbooks.

Definition 1. Let D be a subset of a linear space V . A mapping which assigns to each element of D exactly one real number is called a *functional* defined in D , and it is denoted by

$I : D \rightarrow \mathbb{R}$. A typical example is

$$I(u) = \int_a^b F(x, u(x), u'(x)) dx, \quad (1)$$

defined in $C^1[a, b]$, the space of all real valued functions with a continuous derivative on the interval $[a, b]$.

Remark 1. Definition 1 illustrates the point of view of the functional analysis. In calculus, the notion of a real valued function of a real variable is associated with the real numbers which constitute its values, but the functional analysis view is that it defines a correspondence between pairs of elements of prescribed sets. The concepts of *linear* or *vectorial space* and *normed space* are rather intuitive and can be presented as natural generalizations of the corresponding definitions in the Euclidean space \mathbb{R}^n . These generalized notions are applied throughout mathematics, science and engineering [23], [31], [32].

3. The first variation of a functional

3.1 Heuristic development

As stated above, a number of books and papers have appeared which treat the calculus of variations from a heuristic point of view using a vague and obscure procedure based on an analogy between the variational operator δ and the differential operator d of functions. The following statements have been compiled from some textbooks included in the reference list:

In the calculus of variations it is a common practice to use δu to denote what is defined as the *first variation* of the function u , which is given by

$$\delta u = \varepsilon v, \quad (2)$$

where ε is a *small* arbitrary real number and v

an arbitrary function. Thus δu is considered as an operator that changes from the function u into δu . The derivatives are changed in the same form. For instance, du / dx is changed into

$$\delta \left(\frac{du}{dx} \right) = \varepsilon \frac{dv}{dx}. \quad (3)$$

The variational operator can be interchanged with derivatives and integrals. For instance,

$$\delta \int_{\Omega} F dx = \int_{\Omega} \delta F dx. \quad (4)$$

In analogy with the concept of total differential dF of a real function of several variables $F = F(x, y, z)$ given by

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy + \frac{\partial F}{\partial z} dz,$$

the variational operator δ acts like the total differential defined above. In consequence, the first variation of $F = F(x, u, u')$ is defined by

$$\delta F = \frac{\partial F}{\partial u} \delta u + \frac{\partial F}{\partial u'} \delta u'. \quad (5)$$

Finally, in the case of the functional given by (1), the use of property (4) leads to

$$\delta I(u) = \int_a^b \delta F(x, u, u') dx. \quad (6)$$

3.2. Rigorous definitions

Within reasonable limits, the arguments from the extreme values theory of real valued functions of several variables, find their counterpart in the theory of extremes values of functionals. Thus, the concept of the variation of a functional can be easily stated as a generalization of the definition of the directional derivative of a real valued function defined on a subset of \mathbb{R}^n . This procedure should be the key to eliminate the lengthy and obscure definition of the variation of a functional using the Eqs. (2) to (6). Let us recall the definition of directional derivative:

Suppose we are given a real valued function $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ defined on a set $S \subset \mathbb{R}^n$. If \mathbf{x} is an interior point of S and $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$ an arbitrary vector of unit length ($\|\mathbf{v}\| = 1$), then the directional derivative of f at \mathbf{x} in the direction \mathbf{v} is given by

$$f'(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(\mathbf{x} + \varepsilon \mathbf{v}) - f(\mathbf{x})}{\varepsilon},$$

if this limit exists.

If I is a functional defined in a subset D of a vectorial space V , its directional derivative (called variation) is easily furnished by a straightforward generalization of the above definition of directional derivative of a function.

Definition 2. Let I be a functional defined in a subset D of a vectorial space V . If $u \in D$ and $v \in V$, the variation of I in the point u and in the direction v , is given by

$$\delta I(u; v) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{I(u + \varepsilon v) - I(u)}{\varepsilon} = \left. \frac{dI}{d\varepsilon}(u + \varepsilon v) \right|_{\varepsilon=0}, \quad (7)$$

when the ordinary derivative with respect to the real variable ε exists at $\varepsilon = 0$.

Since the application of (7) requires deriving with respect to ε under the integral sign, in the case of the functional defined by (1) we should require that the function $F = F(x, u, w)$ has continuous partial derivatives and $u \in C^1[a, b]$; then, we have

$$\begin{aligned} \delta I(u; v) &= \int_a^b \left. \frac{\partial}{\partial \varepsilon} F(x, u(x) + \varepsilon v(x), u'(x) + \varepsilon v'(x)) \right|_{\varepsilon=0} dx = \\ &= \int_a^b \left(\frac{\partial F}{\partial u}(x, u(x) + \varepsilon v(x), u'(x) + \varepsilon v'(x)) v(x) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial F}{\partial w}(x, u(x) + \varepsilon v(x), u'(x) + \varepsilon v'(x)) v'(x) \right) dx \Big|_{\varepsilon=0} = \\ &= \int_a^b \left(\frac{\partial F}{\partial u}(x, u(x), u'(x)) v(x) + \frac{\partial F}{\partial w}(x, u(x), u'(x)) v'(x) \right) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

The above is well known, at least heuristically, to anyone who works in the field of calculus of variations.

3.3 Admissible directions

In definition 2, it can be noted that element v , which generalizes the concept of direction, is simply an element of the vector space V . It plays an essential role in the minimization of a functional. In this process we are interested in those functions u and directions v , in which the variation of I exists. For instance, if we want to find a function $u \in C^1[a, b]$ so that the functional (1) assumes a minimum where by

$$u(a) = A, \quad u(b) = B, \quad (9)$$

are given, we are not interested in all functions $u \in C^1[a, b]$ but only in those which satisfy the conditions (9). On the other hand, we are interested in considering for each $u \in C^1[a, b]$ those directions $v \in V$ in which the functional I admits the variation $\delta I(u; v)$ as is stated in the following definition.

Definition 3. A direction $v \in V$ is admissible if:

- (i) $u + \varepsilon v \in D$, $\forall \varepsilon$ sufficiently small,
- (ii) $\delta I(u; v)$ exists.

The space of admissible directions is commonly denoted by D_a .

Remark 2. It must be noted that there is no need to introduce the concept of *variation* δu of the actual configuration u which usually is presented in the following form:

«Suppose $u(x)$ is indeed the function of x which gives (1) a minimum value, and $u^*(x)$ is a

second function of x which is *at most infinitesimally different from* $u(x)$ at every point x within the interval $[a, b]$. Define

$$\delta u(x) = u^*(x) - u(x).$$

The variation of a function should be understood to represent an infinitesimal change in the function u at a given value of x . The change is arbitrary; that is, it is a virtual change.»

This lengthy and obscure definition should be avoided because while no advantage is taken of its use, a source of confusion is eliminated. Although it is an ordinary function, in mechanics, it is traditional to denote by δu an admissible virtual displacement of u . It is particularly used in the powerful virtual work principle [24].

3.4 Necessary condition for an extreme

When a real valued function $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ defined on a set $S \subset \mathbb{R}^n$, has a local extremal point $\mathbf{x}_0 \in S$ in which f has continuous partial derivatives, then

$$f'(\mathbf{x}_0, \mathbf{v}) = 0,$$

for each vector $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$ of unit length. In the context of functionals, the following theorem can be demonstrated. See for instance, references [18], [19].

Theorem 1. Let $(V, \|\cdot\|)$ be a normed space and $I : D \rightarrow \mathbb{R}$, where $D \subset V$. If the functional I assumes a local extremum at $u_0 \in D$, then

$$\delta I(u_0, v) = 0, \quad \forall v \in D_a. \quad (10)$$

Remark 3. It must be noted that the condition (10) requires the use of all admissible directions and generally there may be enough

directions to permit this condition to determine the function u_0 . This is consistent with the fundamental lemma which must be applied to obtain a more useful condition than (10).

The fundamental lemma

If $F \in C[a, b]$ and $\int_a^b F(x)v(x)dx = 0$, for any **arbitrary continuous** function v , which verifies $v(a) = v(b) = 0$ for all $x \in (a, b)$, then $F \equiv 0$ on (a, b) .

4. The Euler-Lagrange equation

4.1 Heuristic development

The following statements have been compiled from some textbooks of the reference list:

«The necessary condition for the functional $I(u) = \int_a^b F(x, u, u')dx$, to have a minimum is $\delta I = 0$, so we have

$$\delta I = \int_a^b \left(\frac{\partial F}{\partial u} \delta u + \frac{\partial F}{\partial u'} \delta u' \right) dx = 0. \quad (11)$$

Since we cannot use the fundamental lemma because (11) is not in the adequate form, we integrate the second term by parts and obtain

$$\int_a^b \left(\frac{\partial F}{\partial u} \delta u + \frac{\partial F}{\partial u'} \delta u' \right) dx = \int_a^b \left(\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial u'} \right) \right) \delta u dx + \left. \frac{\partial F}{\partial u'} \delta u \right|_a^b = 0. \quad (12)$$

In the case of fixed ends all admissible variations must satisfy the conditions: $\delta u(a) = \delta u(b) = 0$, then (12) reduces to

$$\int_a^b \left(\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial u'} \right) \right) \delta u dx = 0, \forall \delta u \text{ in } (a, b). \quad (13)$$

In consequence, if the fundamental lemma is applied to (13) with $v = \delta u$, we obtain

$$\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial u'} \right) = 0, \forall x \in (a, b). \quad (14)$$

4.2 Rigorous formalism

Instead of the functional of the preceding discussions, let us consider the more interesting functional which corresponds to a freely vibrating beam.

Let us consider a uniform beam of length l , rigidly clamped at both ends and which executes transverse vibrations when subjected to an external load of density $q = q(x, t)$. We suppose that the vertical position of the beam at any time t is given by the function

$$w = w(x, t), \forall x \in [0, l].$$

It is well known that at time t the kinetic energy and the total potential energy due to the elastic deformation of the beam and the potential energy of the external load are respectively given by

$$E_c = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left(\frac{\partial w}{\partial t}(x, t) \right)^2 dx, \quad (15)$$

and

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^l \left[EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \right)^2 - 2q(x, t)w(x, t) \right] dx, \quad (16)$$

where ρ is the mass per unit length, A the cross-sectional area, and EI the flexural rigidity of the beam.

Hamilton's principle requires that between times t_0 and t_1 , at which the positions are known, the motion will make stationary the action integral

$$I(u) = \int_{t_0}^{t_1} (E_c - E_p) dt,$$

on the space of admissible functions. Hence, from (15) and (16) we have

$$I(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \left[\rho A \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 - EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2qw \right] dx dt. \quad (17)$$

In order to make the mathematical developments required by the use of the applications of the techniques of the calculus of variations, we assume that $w \in C^4(\bar{G})$, where $\bar{G} = [0, l] \times [t_0, t_1]$. Since the beam is rigidly clamped, the boundary conditions are given by

$$w(0, t) = 0, w(l, t) = 0, \forall t \geq 0, \quad (18a,b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = 0, \frac{\partial w}{\partial x}(l, t) = 0, \forall t \geq 0. \quad (19a,b)$$

In view of these observations and since Hamilton's principle requires that at times t_0 and t_1 the positions are known, the domain of the functional (17) is given by

$$\begin{aligned} D^{C,C} &= \left\{ w; w \in C^4(\bar{G}), w(0, t) = w(l, t) = w_x(0, t) = w_x(l, t) = \right. \\ &= 0, \forall t \in [t_0, t_1], w(x, t_0) = h_0(x), w(x, t_1) = h_1(x), \forall x \in [0, l] \left. \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

where h_0 and h_1 denote the functions which give the positions of the beam at t_0 and t_1 and a non-standard notation has been implemented in order to handle the spaces of admissible functions and directions effectively. Thus, the superscripts in (20) are consistent with the ends conditions. From definition 3, it follows that the corresponding space of admissible directions is given by

$$\begin{aligned} D_a^{C,C} &= \left\{ v; v \in C^4(\bar{G}), v(0, t) = v(l, t) = v_x(0, t) = \right. \\ &= v_x(l, t) = 0, \forall t \in [t_0, t_1], v(x, t_0) = v(x, t_1) = 0, \forall x \in [0, l] \left. \right\}. \end{aligned} \quad (21)$$

To see this, we only have to note that for arbitrary $w \in D^{C,C}$ and arbitrary direction $v \in D_a^{C,C}$ it is true that $w + \varepsilon v \in D^{C,C}$, too. The condition (ii) of definition 3 is satisfied if $w, v \in C^4(\bar{G})$ and $q \in C(\bar{G})$. Now, in the case of the functional given by (17), the condition of stationary functional is given by

$$\delta I(w^{C,C}; v) = 0, \forall v \in D_a^{C,C}. \quad (22)$$

If $w, v \in C^2(\bar{G})$ the application of definition 2 leads to

$$\begin{aligned} \delta I(w; v) &= \left. \frac{d}{d\varepsilon} I(w + \varepsilon v) \right|_{\varepsilon=0} = \\ &= \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \left(\rho A \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial v}{\partial t} - EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + qv \right) dx dt, \end{aligned} \quad (23)$$

where $w = w^{C,C}$.

Let us consider the first term in (23). Since $w, v \in C^2(\bar{G})$ we can integrate by parts with respect to t and if we apply the conditions $v(x, t_0) = v(x, t_1) = 0, \forall x \in [0, l]$, imposed in (21) we obtain

$$\int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \rho A \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial v}{\partial t} dx dt = - \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} v dx dt.$$

In an analog situation since $w, v \in C^4(\bar{G})$ we can integrate by parts twice with respect x , to thus obtaining

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} dx dt &= \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) v dx dt + \\ &+ \int_{t_0}^{t_1} \left[- \frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) v \Big|_0^l + EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_0^l \right] dt. \end{aligned} \quad (25)$$

By replacing (24) and (25) into (23), we have

$$\begin{aligned} \delta I(w; v) &= \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \left(-\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + q \right) v dx dt + \\ &+ \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) v \Big|_0^l - EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_0^l \right] dt. \end{aligned} \quad (26)$$

According to (21) and (26), the condition (22) reduces to

$$\begin{aligned} \delta I(w; v) &= \int_{t_0}^{t_1} \int_0^l \left(-\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + q \right) v dx dt = 0, \\ &, \forall v \in D_a^{E,E}, \end{aligned} \quad (27)$$

where $w = w^{C,C}$.

Now the application the fundamental lemma of calculus of variations in \mathbb{R}^n , it follows that the function $w^{C,C}$ must satisfy the differential equation

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \right) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = q(x, t), \quad \forall x \in (0, l), \forall t > 0. \quad (28)$$

It has been demonstrated that the boundary value problem which corresponds to a vibrating beam rigidly clamped is given by the differential equation (28) and the boundary conditions (18)-(19).

Now, let us assume that the beam is simply supported at both ends. In the manner of achieving the spaces (20) and (21) we have that, in this case, the spaces of admissible functions and directions are respectively given by

$$\begin{aligned} D^{S,S} &= \left\{ w; w \in C^4(\bar{G}), w(0,t) = w(l,t) = 0, \forall t \in [t_0, t_1], \right. \\ & \left. w(x, t_0) = h_0(x), w(x, t_1) = h_1(x), \forall x \in [0, l] \right\}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} D_a^{S,S} &= \left\{ v; v \in C^4(\bar{G}), v(0,t) = v(l,t) = 0, \forall t \in [t_0, t_1], \right. \\ & \left. v(x, t_0) = v(x, t_1) = 0, \forall x \in [0, l] \right\}. \end{aligned} \quad (30)$$

Now, the condition of stationary functional is given by

$$\delta I(w^{S,S}; v) = 0, \forall v \in D_a^{S,S},$$

and by virtue of the inclusion $D_a^{E,E} \subset D_a^{S,S}$, we have

$$\delta I(w^{S,S}; v) = 0, \forall v \in D_a^{C,C},$$

from which it follows that the function $w^{S,S}$ must satisfy the differential equation (28).

By replacing w by $w^{S,S}$ in Eq. (26) and using directions from the space (30), the condition (22) reduces to

$$\delta I(w; v) = \int_{t_0}^{t_1} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_0^l \right) dt = 0, \forall v \in D_a^{S,S} \text{ con } w = w^{S,S}$$

In the manner of achieving (28) we have that the function $w^{S,S}$ must satisfy the differential equation (28), the geometric boundary conditions (18 a, b) and the natural boundary conditions

$$EI(0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(0, t) = 0, \quad EI(l) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t) = 0, \forall t \geq 0. \quad (32 \text{ a, b})$$

If the beam is free at both ends, we must consider the condition

$$\delta I(w^{F,F}; v) = 0, \forall v \in D_a^{F,F},$$

where

$$D_a^{F,F} = \left\{ v; v \in C^4(\bar{G}), v(x, t_0) = v(x, t_1) = 0, \forall x \in [0, l] \right\}. \quad (33)$$

In the manner of achieving the previous boundary value problems, we have that the function $w^{F,F}$ must satisfy the differential equation (28) and the natural boundary conditions

$$EI(0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(0, t) = 0, EI(l) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t) = 0, \forall t \geq 0, \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EI(0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(0, t) \right) = 0, \frac{\partial}{\partial x} \left(EI(l) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t) \right) = 0, \forall t \geq 0. \quad (35)$$

The remaining boundary conditions are obtained as a combination of the analyzed cases.

5. Concluding Remarks

It has been demonstrated that the use of the mechanical « δ -method» is not necessary since it is a source of confusion and its lack of rigour leads to obscure definitions. Moreover, it is more natural and clearer to present the variation of a functional as a straightforward generalization of the definition of the directional derivative of a real valued function defined on a subset of \mathbb{R}^n . The determination of the space of admissible functions and the space of admissible directions generates a clear statement of the problem. This is particularly true in the study of the dynamical behaviour of structural systems. This has been shown in Section 4.

Surely, opinions will express that the heuristic procedure described in Section 4.1 finally leads to the same correct results of Section 4.2. However, the use of functional analysis leads to a deeper and clearer understanding of the problem. Today, solving practical problems

necessitates the introduction of sophisticated mathematical tools such as the concept of weak solution and Sobolev Spaces. Emphasis should be placed on the use of abstract results because despite of the abstractness of these topics, they lead to very practical outcomes. For instance, the finite element method is a powerful computational technique for the solution of boundary value problems that arise in various fields of engineering and applied science. It is necessary to use the Sobolev spaces to know the qualities of the numerical approximation of the mentioned method, [24], [31]-[33].

There exists a growing gap between pure mathematicians and applied scientists to the point that experts in the two mentioned areas are unable to understand and to communicate. It is impossible to reduce, or at least to stop this gap, if heuristics and obscure mathematical procedures are used. For instance, from some textbooks the following statements have been compiled:

Definition

«Mathematically, a functional is a *real number* obtained by operating on functions from a given set».

Lemma.

$$\text{If } F \in C[a, b] \text{ and} \\ \int_a^b F(x)v(x)dx = 0,$$

for any *arbitrary continuous* function v , for all $x \in (a, b)$, then $F \equiv 0$ on (a, b) .»

It is true that this lemma can be proved without the usual restrictions $v \in C[a, b]$, $v(a) = v(b) = 0$, but then it cannot be used in a problem which involves fixed end points because in this case the admissible directions v are functions which vanish at the endpoints a and b as in the case treated in Section 4.1. It must be noted that in the definition of variation (3.1) ε is a *small* arbitrary real number. Moreover, δu satisfies the conditions: $\delta u(a) = \delta u(b) = 0$, so it is not an *arbitrary continuous* function v for all $x \in (a, b)$, as is required in the above lemma .

This type of imprecision could be originated in the use of obscure and vague concepts which can be avoided using only certain abstractions of what are considered to be simple ideas from elementary calculus.

Finally, it is emphasized that the rigorous procedure described is particularly adequate to derive the boundary value problems of beams with internal hinges and plates with a line hinge. In these cases, the first derivatives of the deflection functions are not continuous (in the points where the hinges are located) and the analytical developments require a careful analysis of the regularity properties of the admissible functions.

References

- [1] R. Courant, *Variational methods for the solution of equilibrium problems and vibrations*, Bulletin of the American Mathematics Society 49 (1943) 1-23.
- [2] G. Leitmann, *The Calculus of Variations and Optimal Control*, Plenum Press, New York, 1981.
- [3] G. A. Bliss, *Calculus of Variations*, The Mathematical Association of America, 1971.
- [4] L. V. Kantorovich, V. I. Krylov, *Approximate Methods of Higher Analysis*, Interscience Publishers, 1964.
- [5] F. Hildebrand, *Methods of Applied Mathematics*, Prentice Hall, 1965.
- [6] R.S. Schechter, *The Variational Method in Engineering*, Mc Graw Hill Book Co., 1967.
- [7] C. Lanczos, *The Variational Principles of Mechanics*, Univ. of Toronto Press, 1970.
- [8] L. A. Pars, *An Introduction to the Calculus of Variations*, Heinemann Ltd., London, 1962.
- [9] L. Elsgoltz, *Ecuaciones Diferenciales y Cálculo Variacional*. Editorial Mir, Moscú, 1977.
- [10] C. Dym, I. Shames, *Solid Mechanics: A Variational Approach*, Mc Graw Hill Book Co., 1973.
- [11] G. Krasnov, G. Makarenko, A. Kiseliov, A. *Cálculo Variacional*, Editorial Mir, 1976.
- [12] R. Weinstock, *Calculus of Variations with Applications to Physics and Engineering*, Dover Publications, Inc., New York. 1974.
- [13] J. N. Reddy, *Mechanics of Laminated Anisotropic Plates: Theory and Analysis*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1997.
- [14] U. Brechtken-Manderscheid, *Introduction to the Calculus of Variations*, Chapman and Hall London, 1991.
- [15] T. Hromadka, *The Best Approximation Method*

- in Computational Mechanics*, Springer Verlag, 1993.
- [16] G. M. Ewing, *Calculus of Variations with Applications*, Dover Publications, New York, 1985.
- [17] D. R. Smith, *Variational Methods in Optimization*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.
- [18] H. Sagan, *Introduction to the Calculus of Variations*, Mc Graw Hill Book Co., 1969.
- [19] J. L. Troutman, *Variational Calculus and Optimal Control*, Springer-Verlag, New York, 1996.
- [20] P. Blanchard, E. Brüning, *Variational Methods in Mathematical Physics*, Springer-Verlag, 1992.
- [21] I. Guelfand, S. Fomin, *Calculus of Variations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1963.
- [22] M. Giaquinta, S. Hildebrandt, *Calculus of Variations I*, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [23] L. P. Lebedev, M. J. Cloud, *Calculus of Variations and Functional Analysis: with Optimal Control and Applications in Mechanics*, World Scientific, NJ, 2003.
- [24] L. P. Lebedev, M. J. Cloud, *Introduction to Mathematical Elasticity*, World Scientific, NJ, 2009.
- [25] R. D. Blevins, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1979.
- [26] R. W. Clough, J. Penzien, *Dynamics of Structures*, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1975.
- [27] W. Nowacki, *Dynamics of Elastic Systems*, John Wiley and Sons, New York, 1963.
- [28] R. Craig, *Structural Dynamics. An Introduction to Computer Methods*, John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [29] S. Timoshenko, D. H. Young, *Vibration Problems in Engineering*, D. Van Nostran Company, Inc, N.J., 1956.
- [30] C. H. Chang, *Mechanics of Elastic Structures with Inclined Members*, Springer-Verlag, The Netherlands, 2005.
- [31] J. Reddy, *Applied Functional Analysis and Variational Methods in Engineering*, Mc Graw Hill, New York, 1986.
- [32] K. Rektorys, *Variational Methods in Mathematics, Science and Engineering*, Reidel Co., Dordrecht, 1980.
- [33] R. O. Grossi, M. V. Quintana, The transition conditions in the dynamics of elastically restrained beams, *Journal of Sound and Vibration*, 316 (2008), 274- 297

Acknowledgments

The present investigation was sponsored by Consejo de Investigaciones de la de la Universidad Católica de Salta. Project N° 115-13.

Telemetría de eventos sísmicos **Adquisición de datos, almacenamiento y transporte**

Pablo Rodrigo Narváez¹, Héctor Rizo¹, Ernesto Bonfiglioli¹, José Viramonte²

Resumen

En el presente trabajo se muestran los avances de un proyecto de desarrollo en curso, que tiene como objetivo dotar al Valle de Lerma, donde se asienta la Ciudad de Salta de una red de Vigilancia Sísmica Continua (RVSC). La misma constará de cuatro estaciones de tres componentes, empleando geófonos Mark L4, para lo cual se deberá desarrollar el sistema de adquisición de datos y su posterior transmisión de forma inalámbrica a la estación base.

En este informe se detalla el sistema de adquisición de datos y su transporte, desarrollado sobre una plataforma microcontrolada.

Palabras clave: Telemetría-redes inalámbricas-acondicionamiento de señales-actividad sísmica-adquisición de datos-geófonos-riesgo sísmico

1. Introducción

La Ciudad de Salta se ubica en el sector Noroeste del Valle de Lerma, una depresión rellena con mantos cuaternarios y rodeada de cerros de edad cenozoica (al este) y terciaria (al oeste). Según la clasificación del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), la región corresponde a la Zona 3 (sismicidad moderada a intensa).

El INPRES tiene varias estaciones de acelerómetros ubicadas en el Valle, que se activan con sismos intensos, tal como el que se produjo el 27 de Febrero de 2010.

La red diseñada constará de 4 estaciones de tres componentes, con monitoreo continuo, re-

gistrando la actividad sísmica de la región, a fin de definir y caracterizar fuentes cercanas a la ciudad. La presente red constará con la posibilidad de comunicación inalámbrica con una estación base a modo de poder visualizar los datos de forma remota y de monitorear a la estación que se requiera por el observador en tiempo real. La misma constará con almacenamiento de datos insitu, en una tarjeta de memoria, en caso de perderse la conexión con base o por estar congestionada la red; De esta manera se asegura el registro continuo, los mismos pueden ser luego transmitidos a base o ser leídos en el lugar.

1. UCASAL, Facultad de Ingeniería, IESIING

2. U.N.Sa., Facultad de Ciencias Naturales, Instituto Geonorte Salta-Argentina

2. Adquisición de Datos

Un paso importante en el desarrollo es diseñar y seleccionar la mejor opción electrónica para la adquisición de los datos provenientes de los geófonos Mark L4 y su posterior transporte de forma inalámbrica. El sistema se puede dividir en los siguientes bloques constitutivos (Figura 1):

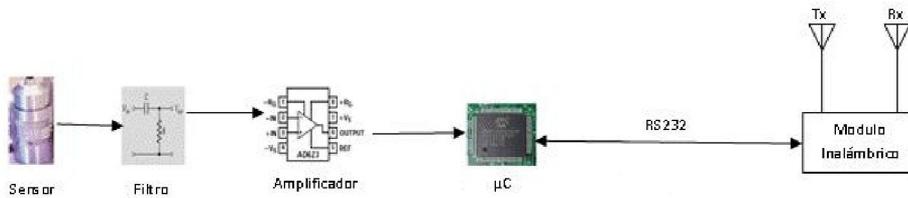


Figura 1. Sistema completo

2.1 Sensor

De forma general los geófonos de péndulo tienen una salida proporcional a la velocidad relativa de sus elementos.

Los sensores sísmicos se clasifican en base a la respuesta de frecuencia que éstos tengan, y se clasifican en tres clases:

Corto periodo: Este tipo de sismómetro está caracterizado por tener una respuesta en velocidad normalmente plana en el rango de frecuencia entre 1 y 50 Hz (donde se sitúa la sismología de corto periodo). Su respuesta en frecuencia y sobre todo su rango dinámico hace a este tipo de instrumento ideal para el estudio de sismicidad local de magnitud moderada a baja, pero no para energías grandes, pues se suele producir la saturación mecánica del instrumento (señal fuera del rango de trabajo del sensor).

Dentro del mercado de este tipo de sismómetros podemos diferenciar al menos dos tipos

Los datos obtenidos del sensor son filtrados y amplificados para luego ser convertidos a formato digital y así enviados al módulo inalámbrico para su posterior transmisión a la estación base, que es la encargada de tratar los mismos, procesarlos y realizar su representación gráfica correspondiente.

de sensores, los denominados sismómetros de prospección y los sismómetros estándar de aplicación para el estudio de microterremotos.

Banda ancha: Aunque en la mayoría de las situaciones el contenido de frecuencias de las señales se centra en el denominado corto periodo, hay casos en los que existen señales a menor frecuencia que 1Hz, como por ejemplo, señales asociadas por cámaras magmáticas.

De movimiento fuerte: Utilizados para detectar movimientos de mediana o fuerte magnitud, no resulta ser una necesidad habitual el registro en aceleración de las señales sísmicas en volcanes, sobre todo porque la energía que se pone en juego es, en comparación con situaciones tectónicas, mucho menor, por lo que los niveles de aceleración del suelo están en los umbrales de detectabilidad de este tipo de instrumentos. Por

tanto, el uso de sensores de movimiento fuerte (acelerógrafos) no resulta ser una práctica muy extendida en la sismología volcánica.

2.2 Estructura Interna

El geófono de péndulo está formado por una estructura sólida, cuya base contiene un imán permanente para generar un campo magnético constante. El péndulo es la parte móvil y está formado por una masa sísmica con una bobina, unidas a la estructura del sensor a través de un resorte.

El movimiento relativo del péndulo dentro del campo magnético constante, generado por un electroimán, se mide en la mayoría de casos a través de un sensor de velocidad, el cual convierte la energía mecánica proveniente de las ondas sísmicas en señal eléctrica. La Figura 2 muestra en forma esquemática este sensor [2].

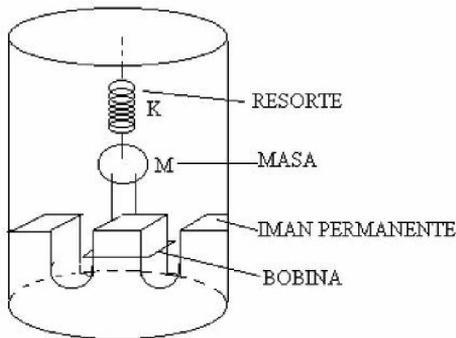


Figura 2. Componentes de un geófono.

El amortiguamiento magnético depende de la resistencia externa equivalente. En la Figura 3 se presenta el circuito eléctrico equivalente deseado para el funcionamiento del geófono, con un amortiguamiento determinado por la resistencia RS.

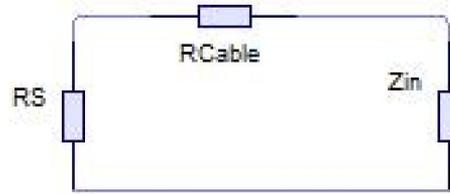


Figura 3. Diagrama circuital que presenta el geófono con amortiguamiento determinado por la resistencia D.

En la Figura 4 se observa la forma de respuesta que se espera obtener cuando a la masa del geófono se le da una posición inicial $Z(0)$ y se la deja oscilar.

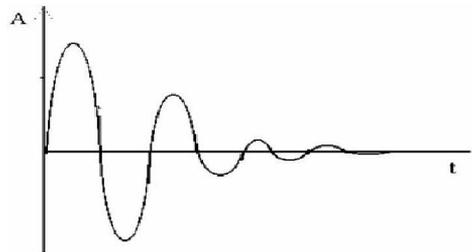


Figura 4. Respuesta Subamortiguada.

Determinando los valores cuando ocurren los picos máximos y los mínimos de la señal de salida, se puede obtener el coeficiente de amortiguamiento b , así [2]:

$$\beta = \left[\left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Despejando

$$\lambda = \frac{\beta\pi}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

b es justamente el coeficiente de amortiguamiento del geófono. Esto quiere decir que se calcula el coeficiente de amortiguamiento de acuerdo a las condiciones propias de cada geófono.

El geófono utilizado Mark L-4C (Figura 6) es un geófono de periodo corto con repuesta lineal en frecuencia de 2hz a 20hz, a continuación se presenta la respuesta del geófono proporcionado por el fabricante.

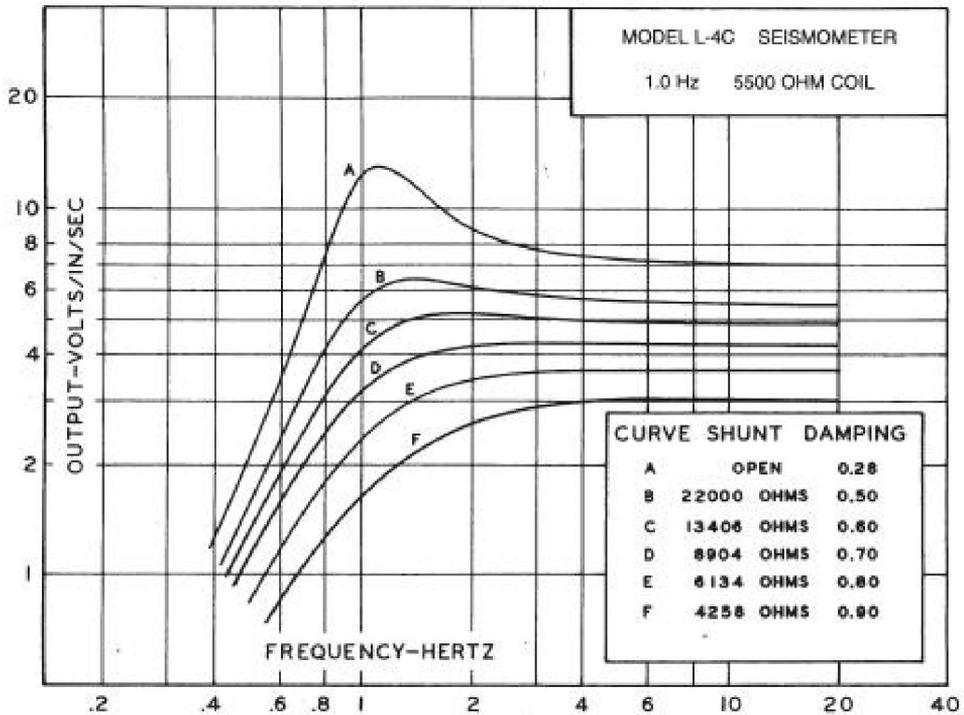


Figura 5. Curva de respuesta del geófono.

Además el fabricante proporciona la expresión para el cálculo del factor de amortiguamiento o damping el cual es:

$$bt = b_0 + bc$$

donde

$$b_0 = 0.28 \text{ damping a circuito abierto } bc = (1.1 * R_s) / (R_s + R_i)$$

R_i = resistencia interna (5500 W) R_s = resistencia damping (8880 W).

Lo cual resulta en un factor de amortiguamiento de:

$$bc = 0,7$$

De la curva de respuesta (Figura 5) se seleccionó la curva D, tener respuesta más plana en frecuencia a partir de 2 a 20 hz. y la cual nos proporciona el factor de amortiguamiento 0,7 que corresponde a una respuesta subamortiguada óptima.[1]

El factor de conversión de volt/inch/seg es de 170Volt/m/seg. para la zona lineal de la curva D.



Figura 6. Geófonos utilizados.

3. Filtro

Esta etapa está conformada por un filtro pasa alto para resolver los problemas del nivel medio de la señal de entrada como lo ilustra la Figura 7.

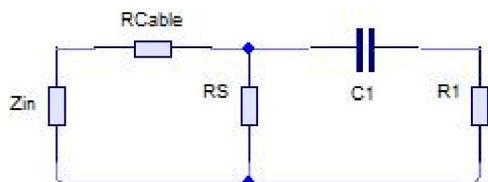


Figura 7. Filtro implementado.

El filtro está constituido por C1 y R1 los cuales fueron seleccionados para que la atenuación fuera mínima en baja frecuencia, menos de 3db por debajo de los 2hz, cuya respuesta es la siguiente (Figura 8):

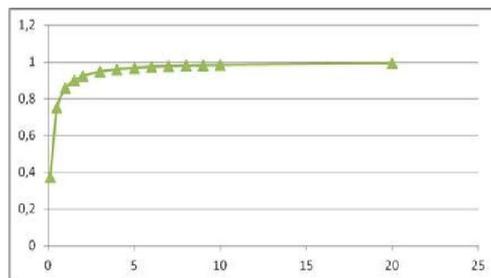


Figura 8. Respuesta del filtro.

4. Amplificador

Una vez que la señal fue previamente filtrada la misma es amplificada en distintas escalas para poder luego se aplicadas al microcontrolador el cual realizará la tarea de la conversión analógico digital. Para ello se asignaron las siguientes escalas (Figura 9):

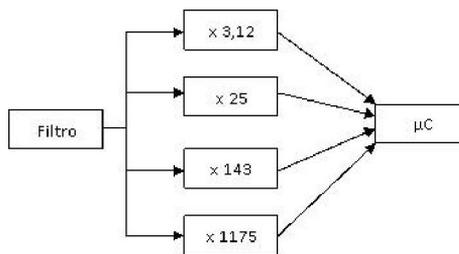


Figura 9. Escalas de amplificación.

Las escalas fueron seleccionadas para barrer toda la respuesta en frecuencia del geófono la lineal y la no lineal. La salida que proporciona el geófono con su respectiva resistencia de damping, es de aproximadamente 32mv/cm/seg. a 1,7v/cm/seg (datos provistos por el fabricante a través de la curva de respuesta del geófono).

El circuito amplificador está conformado por un amplificador de instrumentación AD623[7] y una posterior amplificación mediante el empleo

de amplificadores operacionales LF347[8], como muestra la Figura 10.

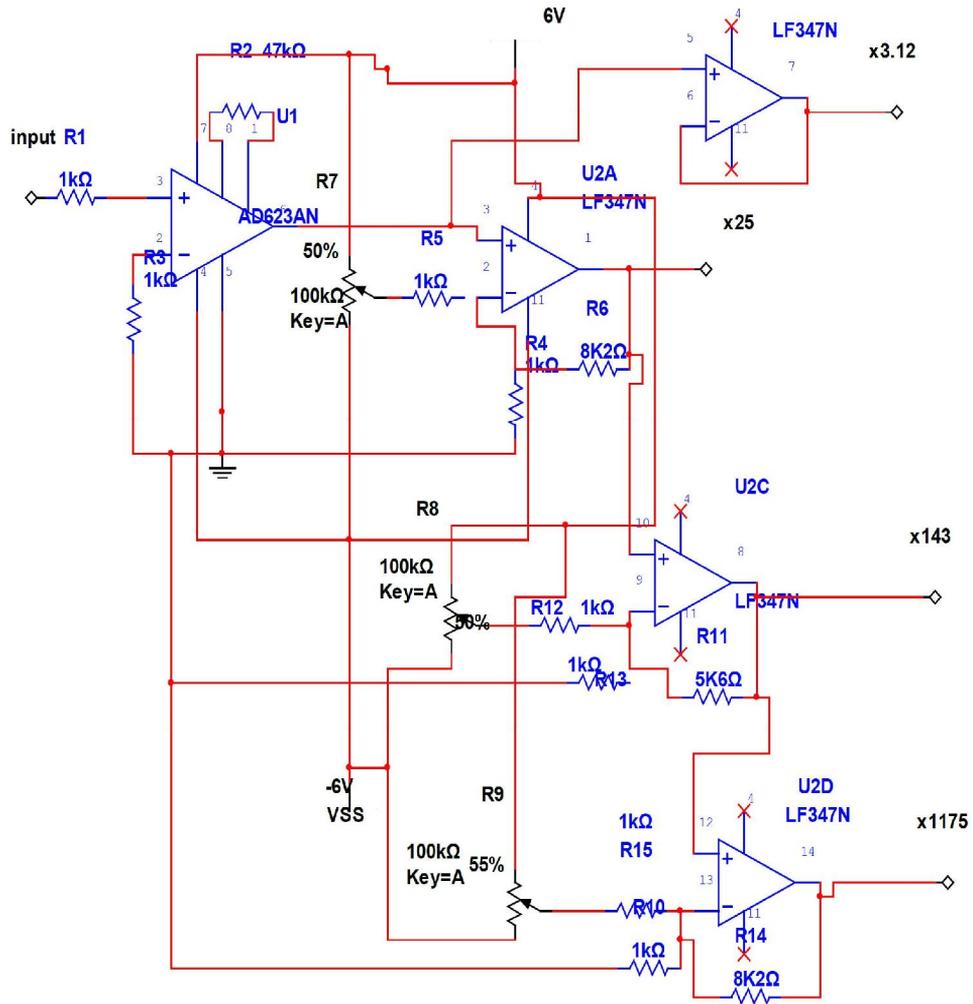


Figura 10. Circuito de amplificación.

5. μ C

El microcontrolador es el encargado de realizar la conversión analógico a digital de las señales provenientes del circuito amplificador, para luego ser transmitidas al módulo inalámbrico. El microcontrolador seleccionado es el Pic18F8722 que es un microcontrolador de la gama media de Microchip. El mismo se seleccionó por el número de patitas disponibles y sus prestaciones. Cada componente es un geófono, de la cual se obtie-

nen 4 escalas, por lo tanto al ser tres componentes se necesitarán 12 entradas disponibles [6].

Además de las 12 entradas utilizadas para las escalas, se necesitaran otras para la conexión del microcontrolador con la tarjeta de memoria (SD/MMC), un módulo GPS, entradas y salidas para el control de carga de la batería, que alimenta toda la electrónica y de algunos sensores más (temperatura, humedad, etc.); todo ello justificó la elección de dicho microcontrolador, que se presenta en la Figura 11.

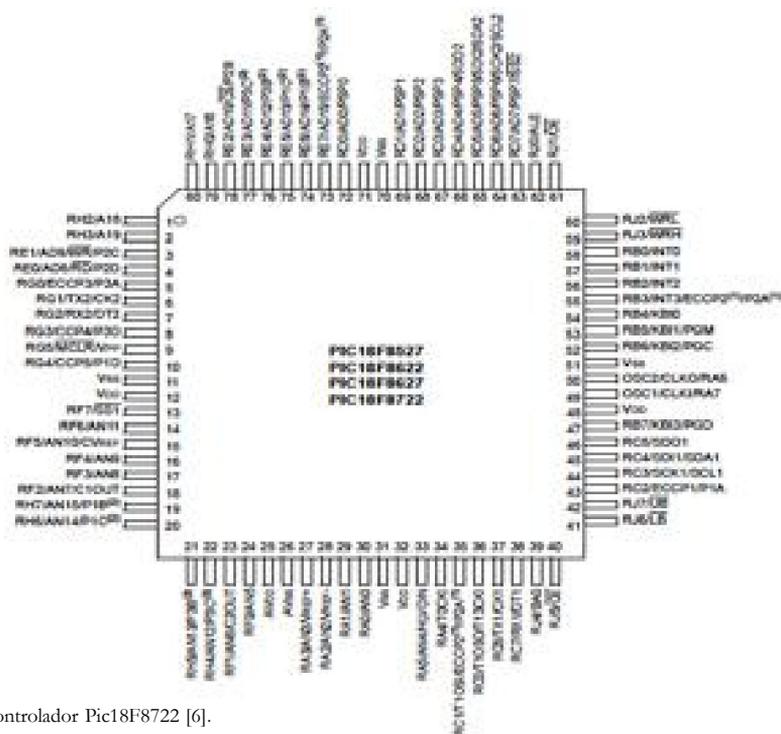


Figura 11. Microcontrolador Pic18F8722 [6].

El convertor analógico-digital es un convertor de aproximaciones sucesivas de 10 bits con 16 canales disponibles para el ingreso de señales, el tiempo de conversión es de 83 μ seg y la frecuencia de conversión máxima es de 12Khz la cual se ve reducida aproximadamente 8Khz por

las demás tareas que el microcontrolador se encuentra realizando como la transmisión serie. La misma es superior a la frecuencia requerida por el teorema del muestreo que es de 40hz.

En la Figura 21 se observa el circuito completo del microcontrolador.

6. Almacenamiento

El almacenamiento de los datos provenientes del microcontrolador se realiza en una tarjeta de memoria de estado sólido SD/MMC o microSD.

Las tarjetas SD poseen 9 pines, de los cuales uno es de reloj (CLK), otro es para los comandos, cuatro son de datos y los tres restantes son de alimentación como se muestra en la tabla 1; Para la MMC son 7 pines; La única diferencia respecto a la SD es que posee sólo dos pines para datos.

El rango de voltaje de alimentación permitido es de 2.7 a 3.6 V.

Internamente, la tarjeta posee chips de memoria flash como medio de almacenamiento. Además posee un controlador inteligente que maneja los diferentes protocolos de comunicación, algoritmos de seguridad para la protección contra copia no autorizada de información almacenada.

A continuación se presenta en las Figuras 12 y 13 la disposición de los pines de conexión de la tarjeta SD [3]:

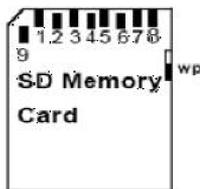


Figura 12. Tarjeta SD [3].

Pin	Name	Type	SD Description
1	CS/DAT32	I/O3	Chip Select/Data Line [Bit 3]
2	CMD/DI	I/O	Command/Data In (SPI)
3	VSS1	S	Supply voltage ground
4	VDD	S	Supply voltage
5	CLK	I	Clock
6	VSS2	S	Supply voltage ground
7	DAT0	I/O	Data Line [Bit 0]
8	DAT1	I/O	Data Line [Bit 1]
9	DAT2	I/O	Data Line [Bit 2]

Figura 13. Descripción de pines[3].

6.1 Comunicación

Si bien las tarjetas SD/MMC aceptan por lo general dos protocolos de comunicación el empleado en el desarrollo del presente trabajo es el protocolo SPI ya que el microcontrolador dispone de dos módulos para el manejo de dicho protocolo.

6.2 Protocolo SPI

Para su implementación necesita solo cuatro líneas de comunicación:

1. SLCK: Señal de reloj (CLK).
2. MOSI: Máster Output, Slave Input. (DATA OUT).
3. MISO: Máster Input, Slave Output (DATA IN).
4. SS: Slave Select (CS).

La memoria recibe los datos y los comandos por DATA IN y envía datos por DATA OUT [4]. Para habilitar la tarjeta se debe poner en nivel bajo el Terminal CS. La señal de CLK que se envía desde el PIC18F8720 es la que establece la velocidad de la comunicación [6].

6.3 Tipo de conexión

Si bien el protocolo SPI soporta varios tipos de conexión, en el presente trabajo se optó por la conexión de un maestro (microcontrolador) y un esclavo (tarjeta).

En este caso la comunicación es sencilla, ya que los dispositivos estarán conectados sin interrupción y transmitiéndose los datos entre ellos sin esperar más que a la señal de reloj que habilite este proceso. Por lo tanto, la señal de SS siempre está activa (nivel bajo) hasta que no haya más

datos que transmitir y se finalice la conexión como muestra la **Figura 14**.



Figura 14. Conexión M/S[3].

6.4 Formato de Comandos

La secuencia de comandos para la tarjeta en modo SPI consiste de 6 Bytes tal como se ilustra en la Tabla 1 [4].

Tabla 1: Secuencia de comandos SPI

Byte 1		Byte 2 - 5		Byte 6	
7	6 5	0	31	0	7 0
0	1	Comand	Comand	CRC	1

El primer byte es el comando (escritura, lectura etc.).

Del segundo byte al quinto son datos adicionales, por ejemplo dirección.

El sexto byte es un byte de verificación.

6.5 Comandos

La memoria contiene varios comandos que funcionan por comunicación SPI, por ejemplo.

1. Reset de la memoria comando 0 (CMD0).
2. Inicialización de la memoria comando 1 (CMD1).
3. Configuración del bloque de 512 bytes comando16 (CMD16).
4. Escritura de un bloque de 512 bytes (CMD24).
5. Lectura de un bloque de 512 bytes comando 17 (CMD17).

Una vez enviado el respectivo comando, la memoria responde por medio de un registro llamado R1 (Figura 15) indicando si hubo un error o si todo está bien [4].

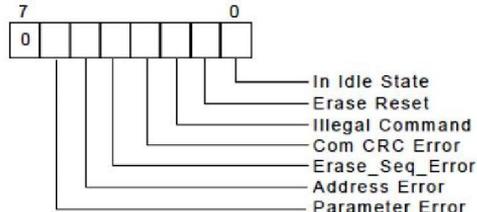


Figura 15. Registro R1.

La memoria debe responder con 0x00 para todos los comando antes mencionados, pero para el comando 0 (CMD0) la memoria responde con 0x01 debido a su estado inicial.

7. Transporte de datos

Los datos almacenados en la tarjeta son leídos por el microcontrolador y luego enviados al módulo inalámbrico mediante la comunicación serie TTL. El módulo seleccionado es el AC4490 de Aerocom, ya que el mismo posee comunicación serie, tiene un alcance de 65km, posee 56 canales de transmisión y una velocidad de transmisión por aire de 78kbps. Como se muestra en la Tabla 2 [5].

7.1 Conexión

Debido a que el presente módulo inalámbrico presenta tres modos de operación: una mediante comandos AT y las otras dos de transmisión y recepción de datos. Las últimas dos formas de operación generalmente se la conoce como transparente.

La modalidad empleada en el presente trabajo es la modalidad transparente, la cual permi-

te transmitir los datos sin la necesidad de la transmisión de un dato extra por el microcontrolador.

El modo comandos AT se puede configurar

de forma inalámbrica; en caso de ser necesario la modificación de algunas características de funcionamiento del módulo.

Tabla 2: Características AC4490

General																													
20 Pin Interface Connector	Molex 87759-0090, mates with Samtec SMM-110-02-S-D																												
RF Connector	Johnson Components 135-3711-822																												
Antenna	AC4490-1x1: Customer must provide AC4490-200: MMCK Connector or integral antenna AC4490-1000: MMCK Connector																												
Serial Interface Data Rate	Baud rates from 1200 bps to 115,200 bps																												
Power Consumption (typical)	<p style="text-align: center;">Duty Cycle (TX=Transmit; RX=Receive)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>10%TX</th> <th>5%TX</th> <th>100%TX</th> <th>100%RX</th> <th>Pwr-Down</th> <th>Deep Sleep</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1x1:</td> <td>33mA</td> <td>54mA</td> <td>80mA</td> <td>28mA</td> <td>15mA</td> <td>3mA</td> </tr> <tr> <td>200:</td> <td>38mA</td> <td>68mA</td> <td>106mA</td> <td>30mA</td> <td>19mA</td> <td>6mA</td> </tr> <tr> <td>1000:</td> <td>130mA</td> <td>650mA</td> <td>1300mA</td> <td>30mA</td> <td>19mA</td> <td>6mA</td> </tr> </tbody> </table>		10%TX	5%TX	100%TX	100%RX	Pwr-Down	Deep Sleep	1x1:	33mA	54mA	80mA	28mA	15mA	3mA	200:	38mA	68mA	106mA	30mA	19mA	6mA	1000:	130mA	650mA	1300mA	30mA	19mA	6mA
	10%TX	5%TX	100%TX	100%RX	Pwr-Down	Deep Sleep																							
1x1:	33mA	54mA	80mA	28mA	15mA	3mA																							
200:	38mA	68mA	106mA	30mA	19mA	6mA																							
1000:	130mA	650mA	1300mA	30mA	19mA	6mA																							
Channels	9 Channel Sets comprising 56 total channels																												
Security	One byte System ID, 56-bit DES encryption key.																												
Interface Buffer Size	Input/Output 256 bytes each																												
Transceiver																													
Frequency Band	902 – 928 MHz																												
RF Data Rate	76.8 kbps fixed																												
RF Technology	Frequency Hopping Spread Spectrum																												
Output Power	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Conducted (no antenna)</th> <th>EIRP (3dBi gain antenna)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1x1:</td> <td>10mW typical</td> <td>20mW typical</td> </tr> <tr> <td>200:</td> <td>100mW typical</td> <td>200mW typical</td> </tr> <tr> <td>1000:</td> <td>743mW typical</td> <td>1486mW typical</td> </tr> </tbody> </table>		Conducted (no antenna)	EIRP (3dBi gain antenna)	1x1:	10mW typical	20mW typical	200:	100mW typical	200mW typical	1000:	743mW typical	1486mW typical																
	Conducted (no antenna)	EIRP (3dBi gain antenna)																											
1x1:	10mW typical	20mW typical																											
200:	100mW typical	200mW typical																											
1000:	743mW typical	1486mW typical																											
Supply Voltage	<p>1x1: VCC: 3.3V, ± 50mV ripple VPA: 3.3V, ± 50mV ripple</p> <p>200: VCC: 3.3 – 5.5V, ± 50mV ripple VPA: 3.3 – 5.5V, ± 50mV ripple</p> <p>1000*: VCC: 3.3 – 5.5V ± 50mV ripple VPA: 3.3 $\pm 3\%$, ± 100mV ripple</p> <p>* VCC & VPA may be tied together, provided the supply voltage never falls below 3.3 V and is capable of supplying 1.5 A of current. VCC & VPA are internally connected on the AC4490-200 only.</p>																												
Sensitivity	<p>-100dBm typical @ 76.8kbps RF Data Rate -110dBm typical @ 76.8kbps RF Data Rate (AC4490LR-200/-1000)</p> <p>*Receive Sensitivity listed for US and Australian Modes. Radios ordered per Brazilian Regulations have a Receive Sensitivity of -80dBm.</p>																												
EEPROM write cycles	20000																												

Las distintas características extras que posee el módulo originan que el mismo disponga de unas 20 líneas de conexión con el mundo exterior como se observa en la Figura 16.

Module Pin	1x1 Pin	Type	Signal Name	Function
1	4	Output	GO0	Generic Output pin
2	6	Output	TXD	Transmitted data out of the transceiver
	N/A	IO	RS485 A (True) ¹	Non-inverted RS-485 representation of serial data
3	7	Input	RXD	Data input to the transceiver
	N/A	IO	RS485 B (Invert) ¹	Inverse of RS-485 A
4	5 ²	Input	GI0	Generic Input pin
5,16	3,13	GND	GND	Signal Ground
6	1	Output	Hop Frame	Pulses Low when the transceiver is hopping.
7	9	Output	CTS	Clear to Send – Active Low when the transceiver is ready to accept data for transmission.
8	10 ²	Input	RTS	Request to Send – When enabled in EEPROM, the OEM Host can take this High when it is not ready to accept data from the transceiver. Keeping RTS High for too long can cause data loss.
9	19	Output	GO1	Generic Output pin
10,11	2,11	PWR	VCC	AC4490-1x1: 3.3V, ±50mV ripple AC4490-200: 3.3 – 5.5V, ±50mV ripple AC4490-1000: Pin 10 (digital supply): 3.3 – 5.5V, ±50mV ripple, 50mA max Pin 11 (Power Amplifier supply): 3.3V ±3%, ±100mV ripple, 1.3A max
12	23	Input	9600_BAUD	9600_BAUD – When pulled logic Low and then applying power or resetting, the transceiver's serial interface is forced to a 9600, 8, N, 1 rate. To exit, transceiver must be reset or power-cycled with 9600_Baud logic High.
13	12	Output	RSSI	Received Signal Strength - An analog output giving an instantaneous indication of received signal strength. Only valid while in Receive Mode.
14	21 ²	Input	GI1	Generic Input pin
15	16	Input	UP_RESET	RESET – Controlled by the AC4490 for power-on reset if left unconnected. After a Stable power-on reset, a logic High pulse will reset the transceiver.
17	17	Input	Command/Data	When logic Low, the transceiver interprets Host data as command data. When logic High, the transceiver interprets Host data as transmit data.
18	15 ²	Input	AD In	10 bit Analog Data Input
19	20 ⁴	Output	DA Out	10 bit Analog Data Output
20	18	Output	IN_RANGE	In Range – Active Low when a Client transceiver is in range of a Server on same Channel with the same System ID. Always Low on a Server (unless Synch-Channel is enabled).
N/A	14	RF	RF PORT	RF Interface.
N/A	22	Input	RESET	Active Low version of UP_RESET. If RESET is used, UP_RESET should be left floating.

Figura 16. Pines del Módulo.

7.2 Modo Comando

En modo comando el modulo requiere de la introducción de una secuencia determinada de datos (comandos AT), en este modo se tiene acceso a la configuración de funcionamiento del

modulo, al manejo de la memoria EEPROM interna que posee el modulo y al manejo del convertor A/D como así también de algunas entradas y salidas digitales de propósito general.

A continuación se presenta algunos comandos AT más utilizados en la Tabla 3.

Tabla 3. Comando AT

Command Name	Command (All Bytes in Hex)						Return (All Bytes in Hex)			
AT Enter CommandMode	0x41	0x54	0x2B	0x2B	0x2B	0x0D	0xCC	0x43	0x4F	0x4D
Exit AT Command-Mode	0xCC	0x41	0x54	0x4F	0x0D	-	0xCC	0x44	0x41	0x54
Status Request	0xCC	0x00	0x00	-	-	-	0xCC	Firmware Version	0x00: Server 0x01: Client in range 0x03: Client out of range	
Change Channel	0xCC	0x02	New Channel		-	-	0xCC	New Channel		-
Change Server/Client	0xCC	0x03	0x00: Server 0x03: Client		-	-	0xCC	Firmware Version	0x00: Server 0x03: Client	
Change Sync Channel	0xCC	0x05	New Sync Channel		-	-	0xCC	New Sync Channel	-	-
Sleep Walk Power Down	0xCC	0x06	-	-	-	-	0xCC	Channel	-	-
Sleep Walk Wake Up	0xCC	0x07	-	-	-	-	0xCC	Channel	-	-
Broadcast Packets	0xCC	0x08	0x00: Addressed 0x01: Broadcast		-	-	0xCC	0x00 or 0x01	-	-
Write Destination Address	0xCC	0x10	Byte 4 of Dest. MAC		Byte 5	Byte 6	0xCC	Byte 4 of Dest. MAC	Byte 5	Byte 6
Read Destination Address	0xCC	0x11	-	-	-	-	0xCC	Byte 4 of Dest. MAC	Byte 5	Byte 6
Forced Calibration	0xCC	0x12	0x00	0x00	-	-	0xCC	Firmware Version	0x00: Server In Normal Operation 0x01: Client In Normal Operation 0x02: Server In Acquisition Sync 0x03: Client In Acquisition Sync	
Auto Destination	0xCC	0x15	bit-0: Auto Destination bit-1: Auto Channel bit-4: Enable Auto Destination bit-5: Enable Auto Channel				0xCC	bit-0: Auto Destination bit1: Auto Channel bits-2-7: 0		
Read Digital Inputs	0xCC	0x20	-	-	-	-	0xCC	bit-0: G0 bit-1: G1	-	-
Read ADC	0xCC	0x21	0x01: AD In 0x02: Temp 0x03: RSSI		-	-	0xCC	MSB of 10 bit ADC	LSB of 10 bit ADC	
Report Last Valid RSSI	0xCC	0x22	-	-	-	-	0xCC	RSSI	-	-
Write Digital Outputs	0xCC	0x23	bit-0: GO0 bit-1: GO1		-	-	0xCC	bit-0: GO0 bit-1: GO1	-	-
Write DAC	0xCC	0x24	Update Period	Duty Cycle	-	-	0xCC	Update Period	Duty Cycle	-

7.3 Interface Serial

Para la transmisión y recepción de datos con el microcontrolador el modulo inalámbrico dispone de una interface serial compatible con la UART del microcontrolador esto es una comunicación serie TTL, cuya operación es modo asíncrono.

En este modo los datos se sincronizan con el microcontrolador a través de un bit de inicio y un bit de parada o fin. El modo asíncrono permi-

te la transmisión de un bit adicional para el chequeo de errores en la transmisión que es el bit de paridad, el cual es optativo. Además permite la transmisión de ocho, siete o nueve bits de datos, como así también se puede seleccionar la velocidad de transmisión. Todos estos parámetros pueden ser configurados solo en modo comando.

A continuación se observan en las Figuras 18 y 19 los distintos parámetros que pueden ser configurados:

Data Bits	Parity	Stop Bits	Transceiver Programming Requirements
8	N	1	Parity Disabled
7	N	2	Parity Disabled
7	E, O, M, S	1	Parity Disabled
9	N	1	Parity Enabled
8	N	2	Parity Enabled
8	E, O, M, S	1	Parity Enabled
7	E, O, M, S	2	Parity Enabled

Mark (M) corresponds to 1 & Space (S) corresponds to 0

Figura 18. Formato Serial de datos.

Baud Rate	BaudL (0x42)	BaudH (0x43)	Minium Interface Timeout (0x58)	Stop Bit Delay (0x3F)
115,200	0xFE	0x00	0x02	0xFF
57,600 ¹	0xFC	0x00	0x02	0x03
38,400	0xFA	0x00	0x02	0x0B
28,800	0xF8	0x00	0x02	0x0E
19,200	0xF4	0x00	0x03	0x19
14,400	0xF0	0x00	0x04	0x23
9,600	0xE8	0x00	0x05	0x39
4800	0xD0	0x00	0x09	0x7A
2400	0xA0	0x00	0x11	0xFC
1200	0x40	0x00	0x21	0x00 ²

Figura 19. Velocidad de transmisión

Para el presente trabajo se seleccionó una velocidad de 19200bps entre el microcontrolador y el modulo inalámbrico y un formato de datos de 8 bits de información y un bit de parada.

7.4 Trama

Para la comunicación entre el modulo y la computadora en la estación se debió desarrollar una trama base la cual contiene la información de las distintas componentes y sus escalas respectivas. Parala sincronización del inicio de la trama, la misma tiene una cabecera y un final de trama, como se muestra a continuación en la Figura 20.

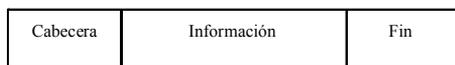


Figura 20. Trama de información

El campo de información está compuesto por un identificador de componente y escala para su posterior decodificación. El mismo está compuesto por 36 bytes de información.

8. Conclusiones

En el desarrollo del presente trabajo, la mayor complejidad fue la adquisición de los datos, razón por la cual se desarrolló de manera modular a fin de poder actualizar la electrónica en caso de ser necesario.

La trama conformada para la comunicación funciona correcta sin detectar cortes en la comunicación ni errores de recepción, ya que el modulo inalámbrico posee una trama rf con corrección y detección de errores; sin embargo a la tra-

ma conformada se le debe agregar CRC, cuestión en la que se trabaja.

La finalización del mismo permite continuar con otras líneas de investigación como la de transmisores inteligentes, el estudio de algoritmos para la detección de sismos, el estudio de la red inalámbrica mas eficiente para el caso de la ocurrencia de sismos y el estudio, tratamiento y representación de los datos.

Referencias

- [1] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna. Editorial Prentice Hall, 2010.
- [2] Cisneros Christian, Marcillo Omar, Enríquez Wilson. Calibrador Digital de Sensores Sísmicos. XIX Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica
- [3] Henaos Carlos, Cardona Edison. Manejo de una memoria SD/MMC con un Pic18f87x. Scientia et Technica Año XVI, No 44, Abril de 2010. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [4] Hoja de datos memoria SD SanDisk Securite Digital Card.
- [5] Hoja de datos modulo inalámbrico AC4490 de Aerocom.
- [6] Hoja de datos del microcontrolador pic18f8722 de microchip. [
- [7] Hoja de datos del amplificador de instrumentación AD623 de Analog Device.
- [8] Hoja de datos del amplificador operacional LF347.

Aplicación de técnicas de evolución diferencial para identificar líneas de rótulas en placas¹

María Virginia Quintana²

Resumen

El efecto de un daño interno que provoca la ruptura de fibras en una o varias capas en placas compuestas se puede modelar con la presencia de una línea de rótulas plásticas o elásticas que suele ser recta en el caso de materiales compuestos reforzados con fibras unidireccionales. Dado que la presencia de un daño en un elemento estructural introduce una flexibilidad local que modifica su comportamiento dinámico, el objetivo de este trabajo es aplicar técnicas de evolución diferencial para detectar, a partir de las características dinámicas del sistema, la presencia de una zona debilitada en placas. La posición, la longitud y la flexibilidad de la línea de rótulas son variables desconocidas y se pretende identificarlas. La estrategia de búsqueda consiste en implementar técnicas de evolución diferencial (ED) combinadas con un algoritmo variacional directo que modele el comportamiento de la placa. El algoritmo mencionado permite obtener las características dinámicas de la placa debilitada durante el proceso de optimización reduciendo el tiempo de cálculo en cada paso de la evaluación. Para verificar la robustez de la técnica propuesta en obtener los parámetros desconocidos que caracterizan la zona debilitada se realizaron 100 pruebas de optimización. Se consideraron dos casos de estudios: una placa con una fisura de borde a borde y una placa con una fisura interna. Palabras clave: evolución diferencial- placas- líneas de rótulas

1. Introducción

Las técnicas dinámicas son consideradas como los métodos de prueba no destructivos más relevante para determinar la presencia de daños en elementos estructurales [Sinha y col. (2002); Patil y Maiti (2005)]. Las pruebas de identificación de daños pueden exigirse en los procedimientos de control de calidad o de producción o bien cuando la estructura puede estar dañada por

cargas accidentales y su integridad debe ser verificada. Cuando el análisis de los resultados se realiza en el dominio de la frecuencia, es posible identificar las frecuencias naturales de vibración y sus correspondientes formas modales. Las variaciones de estas características dinámicas con respecto a las del elemento estructural perfectamente íntegro se utilizan para verificar si algún tipo de

1. XXI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. (ENIEF)

2. INIQUI-CONICET. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Salta.

daño está presente. Resultados numéricos previos confirman que los procedimientos basados en las variaciones de las frecuencias y de los desplazamientos modales son más fiables que aquellos procedimientos clásicos basados solamente en las frecuencias de vibración (Savoia y Vincenzi, 2008; Mottershead y Friswell, 1993; Maia et al., 1997).

En particular, las técnicas dedicadas a identificar la presencia de daños de placas compuestas de varias capas reforzadas con fibra son estudiadas en el dominio de la frecuencia (Ewins, 2000). El efecto de un daño interno que provoca la ruptura de una o varias capas de fibras se puede modelar con la presencia de una línea de rótula plástica o elástica, que suele ser recta, en el caso de los materiales compuestos de varias capas con fibras unidireccionales. La posición y la longitud de la fisura se desconocen y deben ser identificadas. Este problema inverso requiere la minimización de una función de costo que evalúe la diferencia entre la respuesta dinámica de la estructura dañada con respecto a la estructura íntegra o no dañada, la que se obtiene mediante la aplicación de expresiones analíticas o numéricas relacionadas con el modelo estructural teórico.

El proceso de minimización en sí mismo se lleva a cabo mediante diferentes métodos de optimización que permiten la estimación de los parámetros desconocidos (Tang et. al, 2006; Yang et. al, 2007). Dentro de estos, se encuentran los algoritmos heurísticos, tales como los Algoritmos Genéticos (AG) y las Técnicas Evolutivas (TE), los cuales parecen ser una alternativa prometedora a los enfoques tradicionales. En sentido general, la Evolución Diferencial (ED) es una técnica de búsqueda del óptimo de una función basada en la teoría de la evolución natural que trata de encontrar la mejor solución factible a un problema. Varios investigadores utilizaron estas técnicas para identificar sistemas estructurales y pro-

iedades mecánicas de materiales compuestos (Cunha et al., 1999; Franco et al., 2004). En particular, las técnicas de ED han ganado atención y un gran rango de aplicaciones para resolver problemas complejos de optimización desde que Storn y Price (1995) introdujeron el algoritmo en el año 1995. Han sido aplicadas con éxito en diferentes campos (Goldberg, 1989; Storn y Price, 1997) sin embargo no han alcanzado el mismo nivel de desarrollo dentro del campo de la ingeniería civil. Una de las ventajas de estos algoritmos es que son eficaces aún cuando varios parámetros desconocidos deben ser determinados, circunstancias en las cuales los algoritmos clásicos a menudo fallan debido al mal condicionamiento del problema de optimización (Vanderplaats, 1984).

Por lo expuesto anteriormente, en este trabajo se aplican las técnicas de ED en combinación con un algoritmo variacional para identificar la presencia de una zona debilitada (posición, longitud, severidad de la grieta, etc.) en placas construidas con materiales compuestos reforzados con fibra a partir de las características dinámicas del sistema.

2. Formulación del problema

La idea básica en las metodologías para identificar zonas dañadas en elementos estructurales es comparar la respuesta del sistema en su estado íntegro con las respuestas obtenidas cuando algún daño está presente. La placa laminada se modela mediante un macro elemento utilizando la teoría clásica de placas. Se asume que la zona debilitada por el efecto del daño es una línea recta con rótulas elásticas (ver Figura 1). La posición, la longitud y la rigidez de los resortes elásticos son parámetros desconocidos que caracterizan la zona debilitada del elemento y por lo tanto deben ser identificados para poder evaluarla.

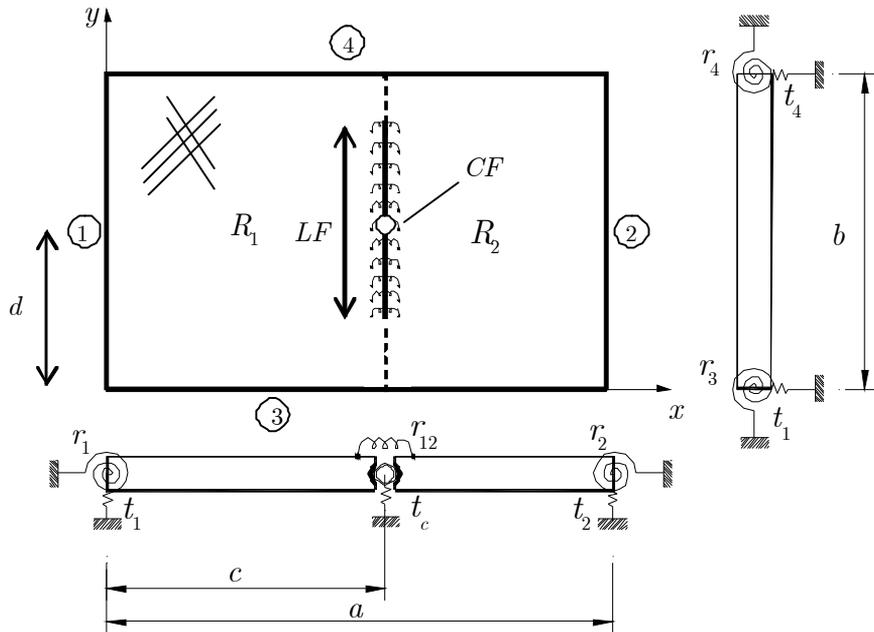


Figura1. Placa con una línea con rótulas interna– Parámetros que definen su ubicación.

Los datos de entrada son los valores de las frecuencias de vibración y de los desplazamientos modales en posiciones arbitrarias de la placa dañada. Luego mediante un algoritmo de evolución diferencial se realiza la identificación dinámica de las variables desconocidas. En general, en los métodos de identificación, las características dinámicas del sistema en cada etapa de la simulación se obtienen mediante la aplicación del método de los elementos finitos (MEF). En este trabajo, se sustituye la aplicación del MEF por un algoritmo variacional directo basado en el método de Ritz y desarrollado por la autora (Quintana y Grossi, 2011 y 2013). Este algoritmo, en comparación al MEF, tiene la ventaja de modelar a la placa como un macro elemento lo que permite reducir los tiempos de cálculos.

En los problemas de identificación dinámica, los parámetros desconocidos del modelo nu-

mérico se ajustan, mediante una función objetivo, con el fin de obtener las predicciones numéricas de los valores modales lo más cercanos posible a los valores medidos experimentalmente. La función propuesta depende de la diferencia entre los valores de las frecuencias y de las deformaciones modales obtenidos del modelo con los datos exactos impuestos y aquellos obtenidos con los valores provisionales de los parámetros desconocidos en cada simulación.

3. Algoritmos de evolución diferencial

En sentido general la ED es una técnica de búsqueda del óptimo de una función basada en la teoría de la evolución natural que trata de encontrar la mejor solución factible a un problema. Comienza con la creación aleatoria de una población inicial de un grupo de individuos. Sigue

un proceso de evolución de la población a partir del descarte de algunos miembros y la formación de otros nuevos siguiendo un criterio de comparación que es función de los miembros existentes. El algoritmo combina distintos individuos de la población para generar los nuevos miembros. Si bien la combinación es aleatoria, la selección se realiza de forma tal que los miembros de mejor «Fitness», es decir aquellos para los cuales la función objetivo alcanza valores mínimos tengan más posibilidades de ser electos. Los individuos nuevos que son aceptados deben heredar algunas de las características de los miembros anteriores y algunos de ellos de-

ben mutar de forma aleatoria. Finalmente, la nueva población que está formada por el conjunto de los nuevos individuos y por otros preexistentes, se somete nuevamente a un proceso de selección, de acuerdo a su «Fitness», para formar con ellos una nueva generación. Lo que caracteriza a la ED es el uso de vectores de prueba, los cuales compiten con los individuos de la población actual con el fin de sobrevivir (Storn y Price, 1997).

El esquema general de un algoritmo de ED se muestra en la Figura 2 y se puede resumir en los siguientes pasos (Tang y Xue, 2008):

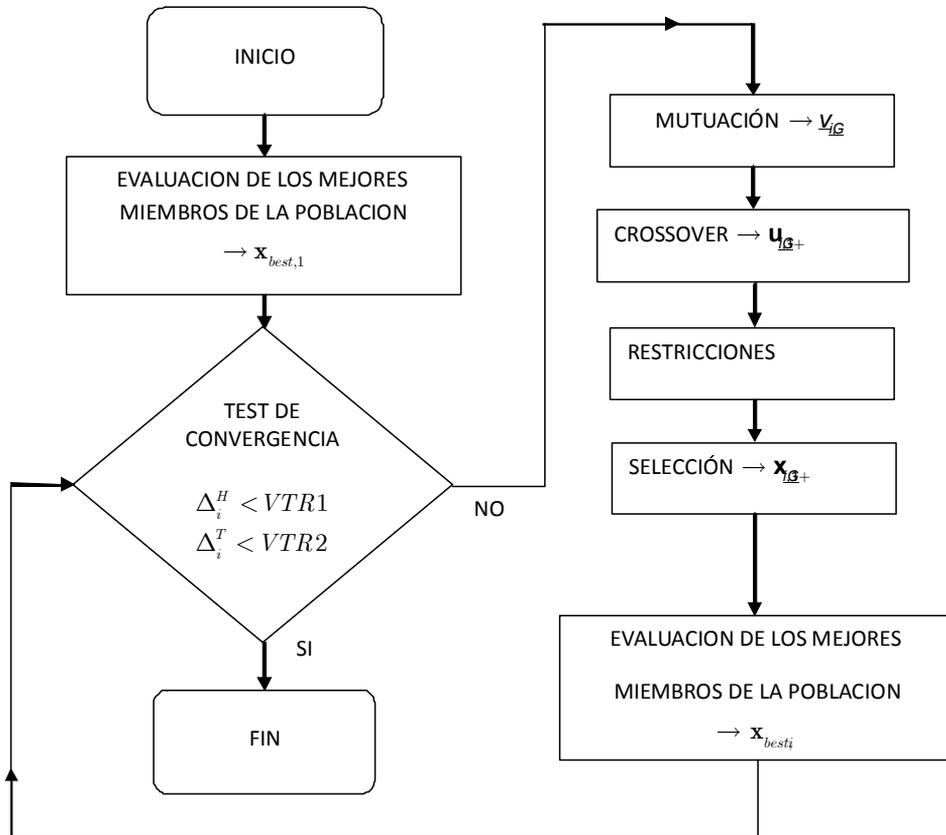


Figura 2. Diseño general de un algoritmo de Evolución Diferencial (ED).

3.1 Implementación de la ED

Los pasos principales para aplicar la metodología de ED se pueden resumir en los siguientes:

Paso 1: Ingreso de los parámetros requeridos por la ED y sus respectivas restricciones. Generación aleatoria de una población inicial $\mathbf{X}_{i,G}$ (vectores) dentro de los límites impuestos por las restricciones, esto es:

$$\mathbf{x}_{i,G} = (x_{i1,G}, x_{i2,G}, \dots, x_{iD,G})^T \in S, \quad i = 1, 2, \dots, NP, \quad (1)$$

donde $S \in R^D$ es el espacio de búsqueda, NP es la cantidad de vectores generados y D es el número de parámetros de optimización (variables del problema) que contiene cada vector $\mathbf{x}_{i,G}$. El subíndice G indica la iteración G –ésima, llamada también generación –ésima de los vectores de parámetros o población. Se supone que el número de vectores de la población se mantiene constante durante el proceso de optimización.

Paso 2: Evaluación del «Fitness» de cada uno de los miembros de la población de la primera generación. Se evalúa la función objetivo en todos los individuos y se determina el vector como aquel que produce el valor mínimo. Este paso requiere la definición previa de la función objetivo.

Paso 3: Realización de la operación llamada *mutación* para cada individuo de la población con el fin de obtener la contraparte de mutantes para cada uno de ellos. El objetivo de la mutación es permitir la diversidad de los parámetros en el espacio de búsqueda y proveer un mecanismo para escapar de óptimos locales al explorar nuevas áreas en el dominio de búsqueda. Para cada vector se genera un *vector de mutantes* utilizando aleatoriamente tres vectores de la población –ésima y algunas de las siguientes estrategias (Storn y Price, 1997):

- Combinación aleatoria (ver la Figura 3):

$$\mathbf{v}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{r_1,G} + F \cdot (\mathbf{x}_{r_2,G} - \mathbf{x}_{r_3,G}) \quad (2)$$

donde $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ son números enteros diferentes entre sí y F es una constante positiva (parámetro de escala) que controla la amplitud de la mutación. Se supone que el parámetro F varía en el intervalo .

- «Mejor» combinación

$$\mathbf{v}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{best,G} + F \cdot (\mathbf{x}_{r_1,G} - \mathbf{x}_{r_2,G}) \quad (3)$$

- «Mejor - Aleatoria» combinación:

$$\mathbf{v}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{i,G} + F \cdot (\mathbf{x}_{best,G} - \mathbf{x}_{i,G}) + F \cdot (\mathbf{x}_{r_1,G} - \mathbf{x}_{r_2,G}) \quad (4)$$

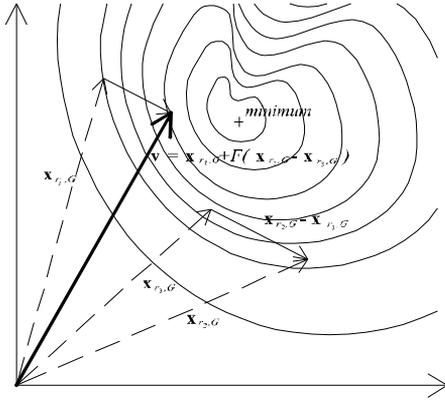


Figura 3: Proceso de mutación en la combinación aleatoria.

La eficacia del método depende de la regularidad de la función objetivo. Para las funciones regulares con sólo un mínimo (global), la estrategia de «mejor» combinación converge más rápidamente ya que el mejor vector obtenido a partir de la generación anterior se interpreta como el vector base. En presencia de más de un mínimo, la combinación «aleatoria» o la combinación «mejor-aleatoria» son las mejores opciones, evitando la convergencia a mínimos locales.

Paso 4: Operación de *cruce* entre cada individuo y su homólogo mutante correspondiente con el fin de aumentar la diversidad de los vectores.

El *vector de prueba* $\mathbf{u}_{i,G+1}$ se obtiene aleatoriamente al intercambiar los valores de los parámetros de optimización entre los vectores originales de la población $\mathbf{X}_{i,G}$ y los de la población de mutantes $\mathbf{V}_{i,G+1}$, esto es:

$$\mathbf{u}_{i,G} = (u_{1i,G}, u_{2i,G}, \dots, u_{Di,G})^T, \quad (5)$$

donde

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } \text{rand}(j) \leq CR \\ x_{ji,G} & \text{if } \text{rand}(j) > CR \end{cases} \quad (6)$$

$j = 1, 2, \dots, D$ y u_{ji} es la componente j -ésima del vector \mathbf{u}_i . Por otra parte, $\text{rand}(j)$ es el j -ésimo valor de un vector de números aleatorios distribuidos uniformemente y CR la constante de cruce ($0 < CR < 1$). Esta constante indica el porcentaje de mutaciones que se tiene en cuenta en el vector de prueba $\mathbf{u}_{i,G+1}$.

Paso 5: Aplicación de las *restricciones de borde* a los parámetros de optimización con el fin de evitar algún individuo con un conjunto de parámetros físicamente no posibles y que devuelva un valor exagerado de la función de costo.

Por lo general, en aplicaciones de ingeniería, los parámetros de optimización están obligados a pertenecer a determinados intervalos, es decir:

$$x_{ji,G} \in [x_{ji,\min}, x_{ji,\max}] \quad (7)$$

donde $j = 1, 2, \dots, D$ y D es el número de parámetros de optimización.

La introducción de las restricciones a los parámetros de optimización es útil dado que limita el análisis solo a rangos de parámetros desconocidos que son significativos desde el punto de vista físico. Para ello, se introduce un algoritmo de proyección. Después de la operación de mutación, si se obtiene un vector fuera de rango se considera su proyección sobre el intervalo de restricción previsto (ver Savoia y Vincenzi (2008) para más detalles).

Paso 6: Proceso de *selección* entre cada individuo y su correspondiente homólogo de prueba con el fin de generar el miembro nuevo de la siguiente generación. Con el fin de decidir si un vector \mathbf{u}_i puede ser un elemento de la nueva población de la generación $G + 1$, cada vector $\mathbf{u}_{i,G+1}$ se compara con el vector anterior $\mathbf{X}_{i,G}$. Si el vector da un valor de la función objetivo menor al valor que produce entonces se selecciona como el nuevo vector de la población, de lo

contrario se mantiene el vector anterior, esto es:

$$\mathbf{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,G+1} & \text{if } H(\mathbf{u}_{i,G+1}) < H(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G} & \text{if } H(\mathbf{u}_{i,G+1}) \geq H(\mathbf{x}_{i,G}) \end{cases} \quad (8)$$

donde $i = 1, 2, \dots, NP$

Paso 7: *Evaluación* del «Fitness» de cada uno de los miembros de la población de la generación y determinación del mejor individuo de la nueva población actual. Si el «Fitness» de este nuevo individuo es mejor que el «Fitness» del vector entonces se actualiza el vector con los parámetros del mejor individuo actual y se obtiene su valor objetivo.

Paso 8: Aplicación del criterio de convergencia. Si un criterio de parada se cumple, entonces se procede a la salida del vector \mathbf{x}_{best} y su valor objetivo, de lo contrario se vuelve al paso 3.

En el criterio de convergencia, se comparan los valores de la función de costo obtenidos a partir de los vectores de la población $G + 1$. Los vectores se ordenan en función de dichos valores de la siguiente manera:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{1,G+1} \prec \tilde{\mathbf{x}}_{2,G+1} \prec \dots \prec \tilde{\mathbf{x}}_{NP,G+1}, \quad (9)$$

tal que:

$$H(\tilde{\mathbf{x}}_{1,G+1}) < H(\tilde{\mathbf{x}}_{2,G+1}) < \dots < H(\tilde{\mathbf{x}}_{NP,G+1}), \quad (10)$$

En el criterio de convergencia se define en primer lugar la cantidad de vectores de control NC . Luego la prueba de convergencia se escribe en función de los valores que toma la función de optimización evaluada en los vectores de control, esto es:

$$\Delta_i^H = \frac{|H(\tilde{\mathbf{x}}_{i,G+1}) - H(\tilde{\mathbf{x}}_{i+1,G+1})|}{|H(\tilde{\mathbf{x}}_{i,G+1})|} < VTR_1 \quad (11)$$

donde $i = 1, \dots, NC$ y VTR_1 es la precisión deseada.

La prueba de la convergencia puede ser insuficiente cuando la función objetivo tiene un gradiente bajo cercano al mínimo buscado. Por esta razón, se introduce una segunda prueba de convergencia, lo que condiciona la distancia relativa entre los componentes de los vectores de control a un valor mínimo, es decir:

$$\Delta_{ij}^x = \frac{|\tilde{x}_{ji,G+1} - \tilde{x}_{ji+1,G+1}|}{|\tilde{x}_{ji,G+1}|} < VTR_2 \quad (12)$$

donde VTR_2 es la precisión deseada.

3.2 Función Objetivo

La *función objetivo* o *función de costo* a minimizar durante el procedimiento de identificación, se define como el error relativo entre las frecuencias y los vectores propios $(\omega_i(\mathbf{x}), \phi_i(\mathbf{x}))$ obtenidos al adoptar un conjunto \mathbf{x} de parámetros de identificación y la solución de referencia $(\bar{\omega}_i, \bar{\phi}_i)$, es decir:

$$H = \sum_{i=1}^N \left[\alpha_1 \left(\frac{\omega_i - \bar{\omega}_i}{\bar{\omega}_i} \right)^2 + \alpha_2 \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \left(\frac{\phi_{ij} - \bar{\phi}_{ij}}{\bar{\phi}_{ij}} \right)^2 \right] \quad (13)$$

donde ω_i y ϕ_i denotan la i -ésima frecuencia no amortiguada y el vector propio correspondiente, α_1 y α_2 son constantes de ponderación, N el número de formas modales consideradas y P las componentes del vector propio consideradas.

La solución de referencia (con los valores exactos de los parámetros) y las simulaciones numéricas para un conjunto de parámetros dados se obtienen mediante el algoritmo variacional mencionado en la sección anterior.

4. Casos analizados

Para verificar la robustez en identificar los parámetros a partir de las características modales de la estructura se realizaron 100 pruebas de optimización en placas cuadradas simplemente apoyadas en todos sus bordes y de espesor uniforme h . Se consideraron dos casos distintos de estudios: una situación de daño simulado por una fisura de borde a borde y otra por una fisura interna, en ambos casos los parámetros a determinar fueron la posición de la fisura (es decir de la

línea con rótulas) y la constante del resorte rotacional que simula la flexibilidad local introducida por la fisura. La función de costo se define de acuerdo a la expresión con $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, $N = 4$ formas modales propias y $P = 9$, es decir 9 componentes modales según la disposición que se muestra en la Figura 4. El material de la placa es un compuesto grafito-epoxi, las propiedades físicas de cada lámina son $E_1 = 25\text{GPa}$, $E_2 = 4.8\text{GPa}$, $\mu_{12} = 0.306$, $G_{12} = 1.36\text{GPa}$ y la secuencia de apilamiento de las capas tiene el diseño $0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$.

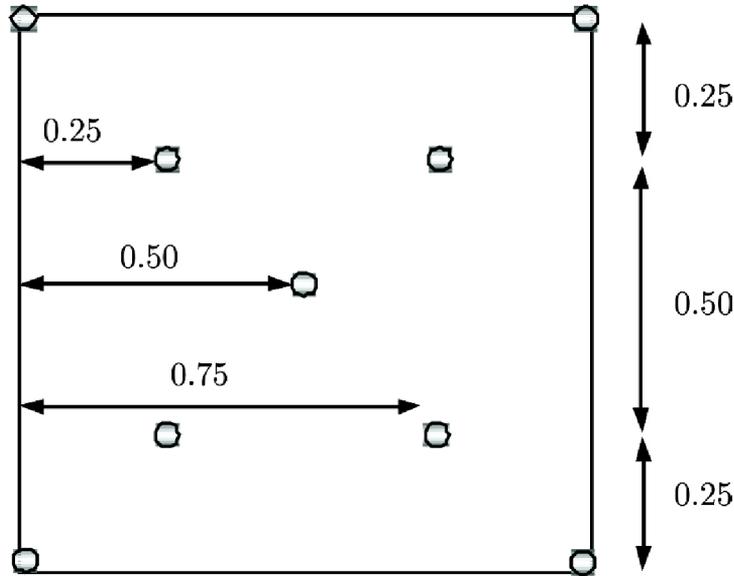


Figura 4: Posición de las componentes modales consideradas.

Tanto la solución de referencia como las simulaciones se obtuvieron utilizando 8 términos en las funciones de aproximación del algoritmo variacional.

Las pruebas numéricas se realizaron utilizando la mejor estrategia de combinación y la estrategia de combinación aleatoria adoptando el valor $F = 0.6$. Las pruebas de convergencia se

definen a partir de las expresiones y utilizando tres vectores de control y las constantes de convergencia $VTR1 = 0.01$ y $VTR2 = 0.02$. En ambos casos se utilizaron 15 vectores en cada población ($NP = 15$).

En todos los casos se realizó el análisis estadístico de los valores de los parámetros de identificación obtenidos en las pruebas numéricas.

Mediante tablas se muestran los valores de convergencia del método y su correspondiente coeficiente de variación (C.V.).

4.1 Placa con una línea con rótulas de borde a borde

En primer lugar se analiza una placa con una línea con rótulas de borde a borde, tal como se muestra en la Figura 5.

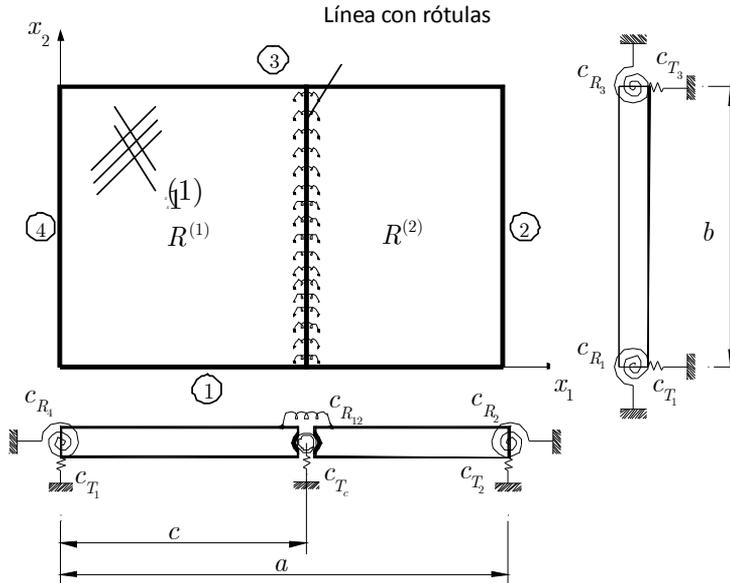


Figura 5. Placa cuadrada con una línea intermedia con rótulas restringidas elásticamente.

En este caso el problema de identificación tiene dos variables, la posición de la línea $\bar{c} = c/a$ y la rigidez del resorte rotacional R_{12} . Por conveniencia numérica, el valor del parámetro se normaliza de la siguiente manera:

$$R_{12} = \frac{R_D}{1 - R_D}, \text{ entonces } R_D \in [0, 1) \quad (14)$$

por lo tanto la variable es remplazada por . En vista de lo anterior, el espacio de búsqueda de los parámetros de optimización se limita a:

$$R_D \in [0, 1) \text{ y } \bar{c} \in (0, 1)$$

En la Tabla 1 se muestra el análisis estadístico de los resultados obtenidos después de la aplicación del algoritmo ED utilizando las estrategias de combinación propuestas. Se presentan los valores de referencias de los parámetros (los valores obtenidos con un caso arbitrario de una placa fisurada), el rango de variación (valor mínimo y valor máximo) de los valores de los parámetros obtenidos durante el proceso de optimización, el valor medio y el coeficiente de variación (desviación estándar dividida por el valor medio). En ambos casos, se puede observar que los valores medios de los parámetros de

identificación alcanzados son muy cercanos a los valores de referencias, observándose una mejor concordancia cuando se utiliza la mejor estrategia de combinación.

Tabla 1

Análisis estadístico de los valores de los parámetros de optimización obtenidos con dos estrategias distintas de combinación ($NP = 15, N = 4, P = 9$).

Parámetros de Identificación	Valor de Referencia	Mejor combinación				Combinación aleatoria			
		Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V.%
R_D	0,1	0,104	0,091	0,099	4%	0,115	0,091	0,100	7%
\bar{c}	0,4	0,425	0,399	0,403	2%	0,472	0,399	0,409	6%

4.2 Placa con una línea con rótulas interna

En esta sección se analiza una placa con una línea con rótulas interna, tal como se muestra en la Figura 1. En este caso el problema tiene 4 parámetros de identificación, la posición de la línea \bar{C} , el centro de la línea CF , su longitud LF y la variable R_D .

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos para el problema planteado cuando se considera una fisura equivalente a una constante de rigidez rotacional $R_D = 0.1$ y tres parámetros de identificación: CF , LF y \bar{c} . Por otro lado en la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos cuando se considera fija la posición de la lí-

nea $\bar{c} = 0.4$ y desconocidos los parámetros: CF , LF y RD , y . Finalmente en la Tabla 4 se analizan los resultados obtenidos cuando se consideran desconocidos los cuatro parámetros que definen la línea interna con rótulas.

En todas las tablas se presentan los valores de referencias de los parámetros, el rango de variación (valor mínimo y valor máximo) obtenidos durante el proceso de optimización, el valor medio y el coeficiente de variación (desviación estándar dividida por el valor medio). Los resultados son, por supuesto, más dispersos que en el caso analizado anteriormente ya que el problema es más severo porque se incrementó el número de parámetros a identificar.

Tabla 2

Análisis estadístico de los valores de los parámetros de optimización CF, LF y \bar{c} obtenidos con dos estrategias distintas de combinación ($NP = 15, N = 4, P = 9$).

Parámetros de Identificación	Valor de Referencia	Mejor combinación				Combinación aleatoria			
		Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %
CF	0,45	0,768	0,145	0,458	47%	0,744	0,295	0,506	36%
LF	0,6	0,567	0,091	0,348	50%	0,570	0,309	0,405	25%
\bar{c}	0,4	0,636	0,457	0,565	11%	0,620	0,446	0,562	13%

Tabla 3

Análisis estadístico de los valores de los parámetros de optimización CF , LF y R_D obtenidos con dos estrategias distintas de combinación ($NP = 15$, $N = 4$, $P = 9$).

Parámetros de Identificación	Valor de Referencia	Mejor combinación				Combinación aleatoria			
		Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %
CF	0,45	0,612	0,395	0,462	15%	0,534	0,373	0,435	12%
LF	0,6	0,605	0,543	0,582	4%	0,600	0,517	0,568	5%
R_D	0,1	0,984	0,091	0,559	56%	0,826	0,104	0,498	45%

Tabla 4

Análisis estadístico de los valores de los parámetros de optimización CF , LF , R_D y c obtenidos con dos estrategias distintas de combinación ($NP = 15$, $N = 4$, $P = 9$).

Parámetros de Identificación	Valor de Referencia	Mejor combinación				Combinación aleatoria			
		Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Medio	C.V. %
CF	0,45	0,57	0,34	0,46	19 %	0,65	0,40	0,49	16%
LF	0,6	0,59	0,26	0,50	25 %	0,59	0,38	0,54	14%
R_D	0,1	0,91	0,29	0,72	31 %	0,75	0,21	0,52	37%
\bar{c}	0,4	0,58	0,42	0,49	13 %	0,58	0,44	0,51	12%

En la Tabla 2, se puede observar que cuando la rigidez del resorte se asume conocida, los resultados obtenidos con la estrategia de combinación aleatoria son levemente mejores. En este caso el valor de la posición de la línea es el más cercano al esperado, no obstante la dispersión en los resultados es alta. En la Tabla 3 se observa que los valores de CF y LF son cercanos a los valores de referencia y el coeficiente de variación se encuentra en el rango de 5%-15%. En el caso de la predicción de R_D , los valores obtenidos tienen una mayor dispersión. Lo mismo sucede en el caso del problema de identificación mostrado en la Tabla 4. Los valores de c son bastante dispersos y los valores del resto de los parámetros se encuentran en un rango de variación del 12%

al 16% cuando se utiliza la estrategia combinación aleatoria de vectores, la que resulta evidentemente mejor para el caso analizado.

La dispersión en los valores podría estar causada por la forma de la función objetivo, es casi insensible a la variación de la rigidez cuando se considera una línea con rótulas internas o bien a la presencia de mínimos locales que el método no logró detectar.

5. Conclusiones

Se demostró que la técnica de evolución diferencial en combinación con el algoritmo variacional directo, es muy eficaz cuando se analiza el caso de una placa con una línea con rótulas de borde a borde. La estrategia de mejor

combinación se muestra como la mejor opción y el valor de los dos parámetros a identificar se determinó con alta precisión. En este caso se demostró que las frecuencias y los desplazamientos modales son sensibles tanto a la posición de la línea con rótulas como a la rigidez del resorte rotacional.

Si bien las técnicas de evolución diferencial también son eficaces cuando son varios los parámetros desconocidos que deben ser determinados el análisis estadístico de los resultados obtenidos para el caso de una placa con un línea interna con rótulas no fueron del todo satisfactorio.

En este último caso se recomienda hacer una extensa investigación, teniendo en cuenta las diferentes estrategias de optimización, variando el número de vectores de la población inicial o estableciendo diferentes criterios en la definición de la función objetivo con el fin de seleccionar un criterio que proporcione mayor precisión en los resultados, es decir, que la varianza de los parámetros optimizados con respecto a los valores exactos se reduzca significativamente.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA N°1899) y por el Consejo de Investigación de la Universidad Católica de Salta (Proy. N° 111/13).

7. Referencias

Cunha J, Cogan S, Berthod C., 1999. Application of genetic algorithms for the identification of elastic constants of composite materials from dynamic tests. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*; 45(7):891–900.

Ewins, D.J., 2000. *Modal Testing: Theory and Practice*. New York: John Wiley & Sons.

Franco G, Betti R, Lus H., 2004. Identification of structural systems using an evolutionary strategy. *Journal of Engineering Mechanics*; 130 (10):1125–39.

Friswell, M. I., Penny, J. E. T., and Wilson, D. A. L., 1994. Using Vibration Data And Statistical Measures To Locate Damage In Structures, *Modal Analysis. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 9 (4), 239–254.

Goldberg, D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley.

Maia N.M.M., Silva J.M.M. y He J. 1997. *Theoretical and experimental modal analysis*. Research Studies Press, Somerset, England.

Patil D.P., Maiti S.K., 2005. Experimental verification of a method of detection of multiple cracks in beams based on frequency measurements. *Journal of Sound and Vibration* 281, 439-451.

Quintana M.V., Grossi R.O., 2009. Análisis dinámico de placas laminadas trapeziales con una línea de rótula interna, V Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del Noa, Salta, Argentina, Septiembre.

Quintana M. V., Grossi R. O. 2012. Free vibrations of generally restrained plates with an internal line hinge. *Applied Acoustic*. 73(4):356-365 (2012),

Savoia M., Vincenzi L., 2008. Differential

- Evolution Algorithm for Dynamic Structural Identification. *Journal of Earthquake Engineering*, 12, 800-821.
- Sinha J.K., Friswell M.I., Edwards S., 2002. Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data. *Journal of Sound and Vibration*, 251, 13-38.
- Storn R, Price K. 1995 Differential Evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Rep. No.TR-95-012, International Computer Science Institute, Berkley (CA).
- Storn, R., Price, K., 1997. Differential Evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11: 341-359.
- Tang H, Xue S, Chen R, Sato T., 2006. Online weighted LS-SVM for hysteretic structural system identification. *Engineering Structures*; 28: 1728–35.
- Vanderplaats, G.N. 1984. *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Yang J, Pan S, Lin S., 2007. Least-squares estimation with unknown excitations for damage identification of structures. *Journal of Engineering Mechanics*; 133(1):12–21.

La ética en la formación y actividad profesional del Ingeniero¹

José Marcelo Vera²

Resumen

El complejo de Ciencia y Técnica, base de toda Ingeniería, no es moralmente neutro porque posee preferencias por ciertas hipótesis y procedimientos y porque es capaz de transmutar modos de vida, así se colige la necesidad de que el Ingeniero se reconozca como agente moral, es decir reflexivo sobre su labor profesional. El ejercicio de la Ingeniería es acción comunitaria ordenada al fin-bondad de promover obras materiales que sirvan a la vida social, las distintas Ingenierías ofrecen el soporte material del bien común social. La formación ética en la Ingeniería busca no quedarnos con una razón estrictamente ingenieril, pretende que ésta se informe de racionalidad ética, para así difundir una razón tan científica-tecnológica como humanista universal.

Palabras clave: Ingeniería y ética- formación del ingeniero

El Ingeniero como agente moral de la Ciencia y la Técnica

Las obras, los productos, de la Ingeniería si bien deben servir al desarrollo de la vida personal y social de los hombres, de hecho pueden emplearse contra el mismo hombre, contra su misma dignidad; una ciudad puede planificarse para el bien de todos sus habitantes o concediendo privilegios a las zonas de las clases socialmente más poderosas, cierta producción de drogas

puede orientarse a la fabricación de remedios o de estupefacientes adictivos, una esmerada construcción civil puede realizarse como hábitat de actividades familiares o estratégica y funcionalmente ejecutarse para refugio de delincuentes, la lista de ejemplos puede ampliarse tipificando situaciones donde el Ingeniero actúe como agente que simplemente aplica saberes provenientes de la Ciencia y la Técnica sin indagar a qué fines y propósitos puede estar sirviendo. La posibilidad de que el ejercicio ingenieril se efectúe

1. Ponencia en Congreso Nacional de Ingeniería en La Plata-2009 en preparación para el Congreso Mundial de Ingeniería en Bs. As.- 2010, organizado por el Centro de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires.

2. Ingeniero en Construcciones y Magister en Filosofía Contemporánea con Orientación en Ética, desarrolla docencia en las Universidades Nacional de Salta y Católica de Salta.

túe contra el bien de las personas se deriva del hecho de que la Ingeniería no es independiente de la ética y que no son moralmente neutras ni la Ciencia ni la Técnica que aplica el Ingeniero.

Mario Bunge con suma claridad muestra que los lenguajes científicos y técnicos no sólo no prescinden de valoraciones éticas, sino que ellos mismos son valorativa o axiológicamente comprometidos, y lo son en un doble nivel: 1º) porque elementalmente expresan preferencias fundadas por un aparato, un procedimiento o una teoría; y 2º) porque en ocasiones, en especial en las ciencias no formales y no naturales, se incorporan premisas de investigación que son extracientíficas (por ejemplo, desideratas tales como la supervivencia o la primacía de ciertas razas o clases, el bienestar, la cultura y la libertad, o el lucro, el privilegio y el poder). Pero aún más, la ciencia tiene la capacidad de crear valores, pensemos, por ejemplo, en las profundas transmutaciones en los estilos de vida y valores que generaron las revoluciones sociales y tecnológicas de la modernidad (Bunge, 1996: 27-44). Así, por tanto, tenemos que al interior de sus constituciones Ciencia y Técnica son axiológicamente comprometidas, en sus aplicaciones no son neutras o indiferentes en lo que atañe a la ética, y sus producciones históricas son capaces de transmutar valoraciones y modos de vida.

El Ingeniero puede ejercitar su profesión en distintos sentidos y por ello precisa del saber ético que tiene el potencial explicativo de lo que es una acción recta o incorrecta, conducente o inconducente a favor de la dignidad humana, la Ingeniería necesita de la ética como un complemento necesario, sin él puede convertirse en una herramienta que sirva tanto para elevar como para corromper al hombre. Clásicamente se concibe al Ingeniero como el profesional que actúa indagando el porqué, esto en relación a subrayar su

capacidad de proceder fundadamente desde el punto de vista ingenieril; tendríamos que ampliar un tanto esa concepción proponiendo que el Ingeniero sea un profesional tan experto en los «porqué ingenieriles» de su acción como en los «porqué éticos» que imprimen un sentido a su accionar.

Al hecho de que el Ingeniero puede ordenarse a distintas clases de finalidades, y entre ellas a las que son lesivas de la dignidad del hombre, debe agregarse esa otra situación que precedentemente señalamos, la Ciencia y la Técnica que están en la base de la Ingeniería ya desde un inicio están axiológicamente comprometidas y éticamente no son neutras al momento de sus aplicaciones; por esto, se colige que el Ingeniero debe ser un agente moralmente crítico y reflexivo en sus acciones profesionales, tiene que ejercitar una aguda reflexión en dos grados o sentidos, primero al discernir sobre los compromisos que implica seguir ciertas hipótesis, determinadas líneas de investigación y un particular soporte científico-tecnológico, y segundo al analizar las circunstancias concretas en que se desarrolla su acción profesional, por ejemplo, al momento de proyectar, diseñar, calcular, ejecutar y supervisar obras.

Frente a dos cuestiones capitales de nuestra época debe el Ingeniero cultivar y desarrollar su autocomprensión como agente moral de la Ciencia y la Técnica: I) el problema de la «razón instrumental», y II) el sojuzgamiento despótico de la naturaleza por parte del hombre. La cuestión de la «razón instrumental» consiste en que estamos viviendo un estado epocal en el que el raciocinio ya no indaga sobre fines porque estos están dados por mecanismos y estructuras impersonales como el sistema productivo, los medios masivos de comunicación social, y en definitiva por una cultura de masas en la que han

caído los grandes relatos; en tal situación solo le cabe a la razón elegir medios eficientes que lleven a la mejor relación de costos y beneficios, fingiendo que estaría escogiendo fines; la Ciencia y la Técnica estarían siendo los vehículos de ese raciocinio instrumental (Taylor, 1994: 40-44).

La segunda cuestión, la del dominio autoritario del hombre sobre la naturaleza, proviene de una concepción en la que se tiene a la naturaleza como un objeto más, cuyo tratamiento, producción y transformación servirían lícitamente a la autoafirmación del hombre y la construcción de su futuro. La problemática que entraña esa cosmovisión es la situación de que explotando la naturaleza, sin reconocerle sus leyes y sus ritmos, hoy podemos estar gozando de un nivel de bienestar socioeconómico que no podrán tener las futuras generaciones; consecuencia de esta cuestión es que actualmente generamos un desarrollo no sustentable. Como se infiere, urge formar Ingenieros con una profunda y dinámica conciencia de ser agentes morales de la Ciencia y la Técnica, porque así desarrollarán raciocinios que: 1) centrándose en fines concederán sentido a la vida de hombres y sociedades (trascenderán la racionalidad instrumental), y 2) reconociendo vínculos no cosificantes del hombre con la naturaleza permitirán respetar sus leyes estructurantes y así podrán concebir líneas de desarrollo económico sustentables (que satisfaciendo necesidades presentes no comprometan la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades).

La Ingeniería como actividad cooperativa

Es un equívoco concebir al ejercicio profesional de la Ingeniería como una actividad independiente, como actuación de sesgo liberal, es

claro que el Ingeniero debe actuar con criterios personales y de manera autónoma, pero de ello no se infiere que su profesión se ejercite individualmente y sin nexos de conexión con sus pares, con los grupos afectados por su actuación y sin relación con el bien común social. Desde un inicio su formación acontece en el seno de comunidades, institutos y universidades están al servicio del logro de competencias que hacen a una determinada clase de Ingeniero; luego del tramo formativo continúan, y se densifican, las relaciones porque la actuación profesional no puede inadvertir criterios y pautas que fijan asociaciones de Ingenieros ya existentes y los que con formalidad legal emanan de los órganos y colegios profesionales encargados de regular la matrícula y el ejercicio profesional; también las obras del Ingeniero fácilmente se advierten relacionadas al bien común social, porque según estén bien o mal logradas facilitarán u obstaculizarán la vida social.

Siguiendo al filósofo contemporáneo Alasdair MacIntyre la Ingeniería es plausible de ser asimilada con su noción de «práctica», por tal entendemos a:

«...cualquier forma coherente y compleja de actividad humana cooperativa, establecida socialmente, mediante la cual se realizan los bienes inherentes a la misma mientras se intenta lograr los modelos de excelencia que le son apropiados a esa forma de actividad...»

Conforme a esta noción una «práctica» para ser tal precisa: a) complejidad de actividad cooperativa, b) establecimiento social, c) bienes inherentes o internos, y d) modelos de excelencia. La Ingeniería satisface plenamente esos requisitos y en consecuencia es una «práctica», es actividad asociativa y no individual como consigna-

mos precedentemente, su actividad se genera y configura socio-históricamente, posee un bien interno que afirmamos ser «la promoción y concreción de obras materiales, seguras, salubres y funcionales, que sirven al desarrollo de la vida personal, familiar, asociativa y del Estado», y no deja de desarrollarse atenta a los modelos de excelencia que principalmente provienen del mundo académico y de los laboratorios de investigación y de ensayos científicos y tecnológicos. Así, la Ingeniería es una «práctica», en los términos del citado filósofo (MacIntyre, 1987: 233-244), y enseguida, a continuación, precisaremos importantes inferencias a partir de tal asimilación.

La Ingeniería como «práctica» posee un bien interno, una finalidad que tensa y otorga sentido a su desarrollo, éste es según mi evaluación y tal como se indicó en el párrafo precedente: «la promoción y concreción de obras materiales, seguras, salubres y funcionales, que sirven al desarrollo de la vida personal, familiar, asociativa y del Estado»; entiendo que este es el fin, la teleología y el sentido último de toda clase de Ingeniería porque sus productos, diversos y complejos según la especialidad ingenieril que intervenga, sirven como base material o de infraestructura a la vida personal y familiar de los hombres, permiten la vida asociativa en la Sociedad Civil y se ordenan a la dinamización estratégica y rectora social del Estado. En esta comprensión el proyecto y ejecución de una red de gas, la investigación sobre nuevos materiales resistentes, el planeamiento y logro de zonas verdes ecológicas, la enseñanza académica y la conducción de centros de estudios de Ingeniería, la puesta en marcha de una red informática, y todas otras obras provenientes de las múltiples y ricas capacidades ingenieriles tienen el sentido de servir a la efectiva promoción de la vida personal y social; claro está, pueden también esas competencias orde-

narse en sentido contrario, propendiendo a impedir el desarrollo de una genuina vida humana.

Como «práctica» que es la Ingeniería demanda la existencia virtuosa de los miembros adscriptos a la actividad cooperativa, son las virtudes, tal como Aristóteles las concibió y en su misión o función social remarcadas por MacIntyre, las que permiten dinamizar, recrear y poner al servicio del hombre toda especie de Ingeniería; en un mínimo, en condición de absolutamente necesarias, el Ingeniero al menos precisa las virtudes de la veracidad, la justicia, el valor, y algunas otras pocas más, puesto que sin verdad genera desconfianzas mutuas y una comunicación distorsionada, sin justicia produce relaciones lesivas a sus colegas y demás miembros insertos en la cooperación, y sin valor adolece del fundamental atributo de siempre actuar positivamente pese a la adversidad de las circunstancias negativas y contingentes; a estas, y dentro del mínimo de virtudes, debe agregarse la prudencia que como fruto de la experiencia y madre de virtud indica siempre el bien posible de alcanzar y los medios lícitos conducentes para tal bondad. A esta estructura mínima de virtudes, que son el andamiaje de sostén existencial del Ingeniero, corresponde también la adquisición y ejercicio de la templanza, el respeto mutuo, la tolerancia, la laboriosidad, y otras más.

Sin las virtudes no es posible, la consecución del bien propio e inherente a la Ingeniería, pero además hay otro peligro mayor que se deriva de la ausencia de la vida virtuosa: hay bienes externos muy precisos, el prestigio, el poder y el dinero que pueden imponerse sobre el bien propio y de ese modo distorsionar y corromper a los profesionales e instituciones de la Ingeniería. Un Ingeniero puede actuar por: i) la fama que otorga el prestigio de un trabajo público bien realizado, ii) acercarse a niveles de mando y poder en

razón de su desempeño profesional, iii) buscar enriquecerse por obra de su actuación; ciertamente que así como se las describen esas situaciones son lícitas, pero también cabe la posibilidad de que se sigan líneas de comportamientos en las que sólo importen el prestigio, el poder y el dinero, resultando la Ingeniería y su bien propio herramienta para tales propósitos, se coloque a la profesión en situación de servir no a su bien inherente sino a bienes externos. Es mediante las virtudes, personalmente vividas y socialmente establecidas entre los Ingenieros, que se evita instrumentalizar la Ingeniería al servicio de la fama, el mando y las riquezas; las virtudes como excelencia del carácter, habrán de producir rectas acciones capaces de buscar el bien de la Ingeniería solo por el bien que ella comporta y no por ulteriores motivaciones ajenas a la profesión.

Responsabilidad social del Ingeniero

Hemos precisado la índole cooperativa, comunitaria, de la Ingeniería y expresado su misión o finalidad, que sintéticamente es: promover obras materiales que sirvan a la vida personal y social; esta preciada finalidad se logra a través de institutos, universidades, centros de investigación y desarrollo, colegios profesionales, entidades varias, y del ejercicio profesional personal o asociado. El primer y elemental nivel de responsabilidad social es participar *qua Ingeniero* en la finalidad que señalamos, sea individualmente o mediante grupos formalmente dedicados a la profesión; también, puede suceder que por especiales condiciones de capacidad y formación un Ingeniero posea facultades de dirigente, incluso posea dones innatos de líder, entonces podrá, y en ocasiones deberá, acceder a un segundo nivel de responsabilidad social que es el de gestionar y conducir asociaciones formalmente constituidas

para la Ingeniería. Es importante advertir que quien posee capacidades dirigenciales puede, y en situaciones hasta debe, gestionar y conducir asociaciones de la Sociedad Civil u órganos estatales, en tales circunstancias se impone el deber de actuar sin instrumentalizar las instituciones de la Ingeniería. También notemos que dada la necesidad de acciones interdisciplinarias el Ingeniero en un primer nivel de responsabilidad social podrá participar *qua Ingeniero* en grupos que propendan a esa clase de actividad, o en un segundo nivel de responsabilidad social asumir la dirección de centros interdisciplinarios.

El Ingeniero como tal tiene, entonces, ese doble nivel de responsabilidad social: 1º) contribuyendo individual o asociativamente a la consecución del fin bondad de la Ingeniería, incluso en instancias en que la interdisciplinariedad es necesaria; y 2º) gestionando o dirigiendo asociaciones e instituciones que dinamizan y rigen la actividad de la Ingeniería, sea como disciplina autónoma o en necesarias relaciones de diálogo y acción entre disciplinas. Al actuar así como Ingeniero a la vida social le debe, según se infiere de lo que argumentamos, una praxis en la que él se reconoce como sujeto reflexivo y crítico respecto a las aplicaciones de la Ciencia y la Técnica; a él le cabe en orden al bien común social, y como especial imperativo moral demandado por el actual estado cultural, el ser un agente moral, un vehículo ético, de las actuaciones del complejo de Ciencias y Tecnologías, para evitar que el mismo: 1) no subsuma la vida social en una dinámica de racionalidad instrumental que oscurezca todo horizonte de sentidos, y 2) no establezca con la naturaleza una relación de despojo y dominio despótico que impida el despliegue de líneas de desarrollo sustentable.

La responsabilidad social del Ingeniero además se amplía por la solidaridad que él y la Inge-

niería deben a los otros miembros y actividades que integran y vivifican el amplio campo de la vida social. La solidaridad se afina en que todos estamos relacionados en la vida social y en la realización de su bien común, así demanda que cada integrante constituyente del tejido social a la par de buscar su propia finalidad coadyuve a la consecución de los fines de los demás integrantes de la sociedad, requiere también que cada actividad o proceso social a la vez de procurar su bondad colabore con la realización de las bondades posibles de emerger de las restantes acciones y procesos sociales; de este modo, en este sentido, el Ingeniero debe cooperar con los fines de las otras personas y grupos constitutivos de la sociedad, y la Ingeniería debe asistir al correcto desarrollo y realización de las otras actividades que dinamizan la vida social. La responsabilidad social que por solidaridad le compete al Ingeniero y la Ingeniería es tanto más intensa y grave cuanto más formado y capacitado se considera al primero y más potenciada por la Ciencia y la Técnica resulta ser la segunda; precisamente, por esta relevante responsabilidad que le cabe es que el Ingeniero tiene un importante papel de servicio social, posee una ineludible función de dirigencia social, y advertimos que la Ingeniería es una actividad, una «práctica», con un especial peso específico entre todas las actividades y procesos dinamizadores de lo social.

Características y lineamientos de una Ética en la Ingeniería

El decurso de esta argumentación fue ofreciendo motivos relevantes y sustantivos para que los Ingenieros consideremos al estudio y el examen ético como parte constitutiva y esencial de la formación y actividad profesional, sumariamente esas razones son: 1°) todo ingeniero apli-

ca el complejo de Ciencia-Técnica que no es neutro ni moralmente indiferente, además sus aplicaciones sirven para producir obras que pueden favorecer u obstaculizar el ejercicio de la dignidad del hombre, así, por tanto, debe él reconocerse como agente o vehículo ético que crítica y reflexivamente discierne sobre el sentido y finalidad de su praxis; 2°) en la situación de la cultura contemporánea su autocomprensión como agente moral no puede soslayar, sino más bien preocuparse por las problemáticas de la razón instrumental y del desarrollo sustentable; 3°) es la existencia virtuosa la que asegura la recta consecución de la finalidad de la Ingeniería y evita que ésta sea instrumento de la fama, el poder y la riqueza; y 4°) la responsabilidad social del Ingeniero y la Ingeniería demanda elementos de reflexión ética que sean conducentes a garantizar sentidos de servicio social y solidaridad en el rol dirigenal del Ingeniero y en la influencia y gravitación social de la Ingeniería.

Relevada, puesta de manifiesto la necesidad de la Ética en la Ingeniería, se impone la tarea de delinear en trazos generales sus características epistémicas, contenidos centrales y la clase de ejercitación que se colige corresponder a sus instancias de teoría. En primer lugar, y esto con carga de evidencia, no necesitamos desarrollar una filosofía moral o ética filosófica propia del currículo del filósofo profesional, porque los propósitos son muy prácticos y ordenados a las cuestiones de las actuaciones de la Ingeniería; sin embargo, no podemos prescindir de elementos importantes de la ética filosófica, sobretudo al momento de abordar cuestiones de fundamentos (consideraciones antropológicas, basamentos de los principios morales, por ejemplo); en este punto, sea que se enseñe o se aprenda, hay que advertir que existen escuelas éticas, diferentes entre sí y frecuentemente contenciosas en sus rela-

ciones, y que razones pedagógicas o de mejor comprensión temática nos orientarán en cierto sentido filosófico, sin por ello dejar de reconocer las cuotas de verdad que contienen las otras posiciones del saber moral.

La ética que nos interesa y preocupa, la que juzgamos imprescindible, es una que pone en estrecha relación fundamentos filosóficos con la problemática de la Ingeniería como profesión y como actividad de incidencia social, una que vincula lo filosófico con la diversa y compleja acción de la Ingeniería contemporánea, precisamos una «Ética en la Ingeniería», una clase de «ética aplicada», y como tal tendrá las propiedades de ser: a) un continuo de teoría y práctica, un ámbito de saber donde recíprocamente se potencian teoría y práctica; b) interdisciplinaria, no solo por conjugar Filosofía con Ingeniería, sino también por su apertura, según los casos, a disciplinas tales como la Economía y la Sociología; c) socialmente orientada, por preocuparse por toda realidad social afectada por la Ingeniería; y d) dialógica, en cuanto pone en diálogo, y compromete, a distintas corrientes del pensamiento ético (Bonilla, 1998: 42-48).

En sus contenidos una Ética en la Ingeniería tiene que plantearse: I) en sus apartados de fundamentos los temas que caracterizan las clases de saber que son la ética y la ética aplicada, y los que responden a las dos preguntas centrales que preocupa al saber ético: ¿qué debo hacer?, lo que nos remite a indagar sobre los principios morales, y ¿cómo debo ser?, lo que nos conduce al examen de las virtudes; y II) en capítulos de aplicados examinar el ejercicio profesional, la índole moral del Ingeniero en relación a la Ciencia y la Técnica, y la responsabilidad social del Ingeniero; es esta una estructura mínima y abierta, mínima o elemental porque entiendo que compendia temáticas ineludible para el aprendizaje

cognoscitivo ético aplicado que nos interesa, y abierta porque es susceptible de ser enriquecida con nociones y conceptos provenientes de propósitos derivados de particulares especies de Ingeniería, específicos contextos académicos, y singulares experiencias en las distintas actividades posibles de hacer en la Ingeniería (investigación, proyectos, enseñanza, ejecución de obras, y otras más). Es de importancia consignar que la enseñanza-aprendizaje de una Ética en la Ingeniería es tarea para tramos formativos académicos de grado y postgrados, cursos profesionales diversos, comisiones deontológicas en asociaciones y colegios profesionales, comités éticos en asociaciones intermedias u órganos estatales, grupos de discusión en empresas, diálogos y coloquios suscitados en el ejercicio profesional, y en general en toda situación que esté requiriendo un análisis racional de la conducta de las personas involucradas o afectadas por la Ingeniería.

El entrenamiento reflexivo práctico, la instancia más práctica, en una Ética para Ingenieros es el «análisis de casos», esta analítica es la ejercitación más apropiada para desarrollar raciocinio y compromisos éticos del Ingeniero en relación a su formación, actividad profesional y papel dirigencial o de influencia en la vida social. El «caso» es la descripción de una situación moralmente problemática que se suscita en el ejercicio de la Ingeniería, intervienen elementos técnicos y de deliberación y elección ética, presenta distintos cauces posibles de acción humana entre los que mediante el razonamiento se puede argumentar a favor de uno o algunos en orden a realizar la dignidad del hombre y contribuir al bien común social. El «análisis de casos» posee un doble valor formativo porque permite analizar temáticas atinentes a la Ingeniería (ilustra sobre la práctica ingenieril) y conduce a la realización de juicios y valoraciones morales (demanda

reflexividad ética), puede ser presentado y guiado mediante la concurrencia del Ingeniero, que básicamente apelará al saber moral común producto de la experiencia, y por el especialista en filosofía moral en cuanto profesional competente para esclarecer nociones éticas y ayudar en la lógica de los argumentos y fundamentos de los juicios morales. En la formación académica el «análisis de casos» puede ser transversalizado, en cuanto sea una analítica que se efectúe en distintas materias y no sólo en una asignatura con un currículo receptivo del saber ético.

El desarrollo y difusión de una Ética en la Ingeniería es una necesidad tanto más intensa cuanto más comprendemos que la cultura contemporánea está condicionada por el complejo de Ciencia y Técnica que está en la base de la praxis de los Ingenieros, y lo hace con una presencia sumamente dinámica que transforma la vida de los hombres y las sociedades en tiempos y sentidos muy acelerados y diversos; en esta situación epocal la Ingeniería está comprometida en saber discernir sobre si esos potentes dinamismo favorecen o no la realización de la dignidad del hombre y la construcción de sociedades más justas y solidarias, esa responsabilidad nos

hace reconocer su dependencia respecto al saber ético en cuanto él es capaz de conceder sentidos racionales y positivos en orden a la elevación de la persona y la transformación del mundo. Los Ingenieros debemos a nuestro tiempo y nuestras sociedades la tarea de no quedarnos con solo las razones de lo estrictamente ingenieril, sino también de ampliarlas y conjugarlas con la racionalidad de lo ético, debemos desarrollar, desplegar y difundir una racionalidad que sea tan genuinamente científica-tecnológica como ética y humanista universal.

Bibliografía

- Bonilla, Alcira. «La ética aplicada». *Revista enoikos de la Facultad de Ciencias Económicas de la U.B.A.* Número del año 1998.
- Bunge, Mario. *Ética, ciencia y técnica*. Bs. As.: Sudamericana, 1996.
- MacIntyre, Alasdair. *Tras la virtud*. Barcelona: Crítica, 1.987.
- Taylor, Charles. *La ética de la autenticidad*. Barcelona: Paidós, 1994.

Perfil académico de los autores

BARROS, MARÍA ALEJANDRA

Profesora en Ciencias de la Educación, egresada de la Universidad Nacional de Salta. Especialista en Implementación de Proyectos E-Learning. Se desempeña como Referente Tecnológico Institucional en el nivel medio, y como capacitadora en los niveles medio y superior. Fue docente adscripta en la cátedra de Evaluación Educativa en la carrera en Ciencias de la Educación en la Universidad Nacional de Salta. marile74ar@gmail.com

BEREJNOI, CARLOS

Ingeniero Metalúrgico y Doctor en Ingeniería, egresado de la Universidad Nacional de La Plata. Se desempeña como Profesor Adjunto en la Cátedra de Análisis Matemático I y como Profesor Adjunto en la Cátedra de Materiales de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Salta. En el Área de Investigación se especializa en Ciencia de Materiales- Mecánica de Fractura. berejnoi@unsa.edu.ar

GAMARRA CARAMELLA, SOLEDAD

Ingeniera Química, egresada de la Universidad Nacional de Salta, donde actualmente cursa el Doctorado en Ingeniería. Es becaria por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, con lugar de trabajo en la Universidad Católica de Salta, en el marco del proyecto FONARSEC FSNANO 03/10, «Materiales Magnéticos de Estructura Amorfa y Nanométrica». A partir del año 2013 se desempeña como Jefe de Trabajos Prácticos (dedicación simple) en la cátedra Termodinámica I, de la carrera Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Salta. gamarraoledad@gmail.com

GROSSI, RICARDO OSCAR

Doctor en Ingeniería. Se desempeña como Profesor Regular Titular Plenario en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta. Especialista en Matemática Aplicada en Ingeniería. Investigador del CONICET. Categoría I en el Programa de Incentivos. Director del Programa de Matemática Aplicada de Salta. grossiro@unsa.edu.ar

MARTA, LEONARDO

Ingeniero Aeronáutico, egresado de la Universidad Nacional de la Plata. Posee una beca de doctorado del CONICET y se encuentra cursando el último año del Doctorado en Ingeniería en la Universidad Nacional de Salta, con lugar de trabajo en la Universidad Católica de Salta. Se desempeña como jefe de trabajos prácticos en la cátedra Física III de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta. leomarta1917@yahoo.com.ar

MOYA JAVIER

Ingeniero Mecánico con Orientación Diseño y Doctor en Ingeniería. Se desempeña como Profesor Extraordinario de Tecnologías y Procesos de Producción y de Conocimiento y Estudio de Materiales. Director del Laboratorio de Materiales Avanzados (FI-UCASAL) y Jefe del Departamento de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Docente universitario (desde 1988) e Investigador del CONICET (desde 2005). jmoya.fi.uba@gmail.com

NARVAEZ, PABLO RODRIGO

Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Nacional de Córdoba. Se desempeña como Profesor Universitario en la Universidad Católica de Salta desde el 2010 a la actualidad en el área de telecomunicaciones, electrónica y señales. Especialista en el diseño de una gran variedad de equipamiento electrónico. Realiza el doctorado en ingeniería. efeparo@yahoo.com.ar

QUINTANA MA. VIRGINIA

Ingeniero Civil y Doctora en Ingeniería con orientación en Estructuras. Se desempeña como Profesor Adjunto de Dinámica Estructural en la Facultad de Ingeniería e Informática de la UCASAL y Auxiliar de Docencia en Análisis Numérico en la Facultad de Ingeniería de la UNSA. Es Investigadora Asistente del CONICET, realizando investigaciones relacionadas con el modelado numérico del comportamiento mecánico de elementos estructurales. virginiaquintana@argentina.com

VERA, MARCELO

Ingeniero en Construcciones, Profesor Universitario en Ingeniería en Construcciones, Especialista en Formación Ética y Ciudadana, Magíster en Filosofía Contemporánea con Orientación en Ética. Su actividad de Ingeniero y Filósofo se desarrolla en la función pública y en docencia en la Universidad Nacional de Salta y en la Universidad Católica de Salta; es autor del texto «Virtud y Autonomía Personal» y de artículos publicados por EUCASA, participó con ponencias filosóficas en jornadas y congresos locales y nacionales e internacionales. marcelovera@uolsinectis.com.ar