

TRILOGÍA

CIENCIA · TECNOLOGÍA · SOCIEDAD

ARTÍCULOS

Evaluación de los niveles adecuados de reserva de operación en los sistemas eléctricos ibéricos a medio y largo plazo

Modelo constructivo-evolutivo para el RCPSP

Fusión y filtrado de datos inerciales de una IMU de 5dof, para obtención de la actitud de un vehículo u objeto

Estudio de transferencia binaria. (Throughput binario) en función de modulaciones digitales de alta eficiencia espectral para sistemas basados en aeroplataformas móviles-cautivas de Mediana altitud, tipo maps.

Redes neuronales artificiales en predicción de series de tiempo: Una aplicación a la industria

Una experiencia de vinculación con el medio a través de "Aprendizaje y Servicio" en las carreras de: Ingeniería Civil en Computación mención Informática e Ingeniería en informática de la UTEM

Determinación de la rentabilidad del mercado para el modelo de valoración de activos financieros, CAPM

Diseño preliminar de una sala de carga para baterías de tracción de plomo – ácido

Aplicación del modelo de representación de información lingüística 2-tuplas con información multigranular

Resolución y análisis de problemas de búsqueda de caminos mínimos mediante algoritmos metaheurísticos

Sistemas de excitación estática para generadores sincrónicos

Perfil de usuario y lógica difusa: modelo de representación ee perfil de usuario en XML



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
METROPOLITANA
del Estado de Chile

JULIO | 2015

Nº 37 • Vol. 27



UTEM

UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
METROPOLITANA

del Estado de Chile

TRILOGÍA

CIENCIA · TECNOLOGÍA · SOCIEDAD



EDICIONES UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA METROPOLITANA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA

Casilla 9845, Santiago de Chile
Derechos Reservados
Trilogía. Ciencia - Tecnología - Sociedad
I.S.S.N.: 0716-0356
Vol.27, No 37, Julio 2015, Santiago de Chile

• REPRESENTANTE LEGAL

Luis Pinto Faverio

• DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA

Alejandro Velásquez Soto

• EDITOR JEFE

Fernando Ulloa Vásquez

• COMITÉ EDITORIAL

Alejandro Velásquez Soto
Crescente Urrutia Ortega
Fernando Ulloa Vásquez
Jaime Ramírez Gajardo

• DISEÑO - DIAGRAMACIÓN - CORRECCIÓN DE ESTILOS

Vicerrectoría de Transferencia Tecnológica y Extensión
Ediciones Universidad Tecnológica Metropolitana

TRILOGÍA Ciencia - Tecnología - Sociedad

Volumen 27, Número 37, Julio 2015

Trilogía es una publicación semestral
de la Universidad Tecnológica Metropolitana

Agradecemos Canje
Casilla 9845. Santiago, Chile.
Fono: (+56 2) 2 787 75 43
Fax : (+56 2) 2 688 14 21
e-mail: editorial@utem.cl

Trilogía es una revista semestral de la Universidad Tecnológica Metropolitana que se publica desde el año 1981. Sus artículos están indizados e integrados en la base de datos "Fuente Académica" de EBSCO Information Services, en la Revista Interamericana de Bibliografía y en Periódica: Índice de Revistas Latinoamericanas de Ciencias.

Es el órgano oficial de la Universidad Tecnológica Metropolitana que tiene por objetivo difundir los saberes que se generan

a partir de la diversidad disciplinaria que acoge dicha casa de estudio, registrando contribuciones de las Ciencias Exactas, Naturales, Tecnología, Ciencias Sociales, Artes y Humanidades.

Está registrada en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal (Latindex) y en ULRICHWEB: Global Serials Directory.

SUMARIO

1	EVALUACIÓN DE LOS NIVELES ADECUADOS DE RESERVA DE OPERACIÓN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS IBÉRICOS A MEDIO Y LARGO PLAZO	6
2	MODELO CONSTRUCTIVO-EVOLUTIVO PARA EL RCPS	18
3	FUSIÓN Y FILTRADO DE DATOS INERCIALES DE UNA IMU DE 5DOF, PARA OBTENCIÓN DE LA ACTITUD DE UN VEHÍCULO U OBJETO	34
4	ESTUDIO DE TRANSFERENCIA BINARIA (Throughput binario) en función de modulaciones digitales de alta eficiencia espectral para sistemas basados en aeroplataformas móviles-cautivas de mediana altitud, tipo MAPs.	48
5	REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN PREDICCIÓN DE SERIES DE TIEMPO: UNA APLICACIÓN A LA INDUSTRIA	56
6	UNA EXPERIENCIA DE VINCULACIÓN CON EL MEDIO A TRAVÉS DE "APRENDIZAJE Y SERVICIO" EN LAS CARRERAS DE: INGENIERÍA CIVIL EN COMPUTACIÓN MENCIÓN INFORMÁTICA E INGENIERÍA EN INFORMÁTICA DE LA UTEM	86
7	DETERMINACIÓN DE LA RENTABILIDAD DEL MERCADO PARA EL MODELO DE VALORACIÓN DE ACTIVOS FINANCIEROS, CAPM	94
8	DISEÑO PRELIMINAR DE UNA SALA DE CARGA PARA BATERÍAS DE TRACCIÓN DE PLOMO – ÁCIDO	100
9	APLICACIÓN DEL MODELO DE REPRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN LINGÜÍSTICA 2-TUPLAS CON INFORMACIÓN MULTIGRANULAR	110
10	RESOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE BÚSQUEDA DE CAMINOS MÍNIMOS MEDIANTE ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS	128
11	SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESTÁTICA PARA GENERADORES SINCRÓNICOS	138
12	PERFIL DE USUARIO Y LÓGICA DIFUSA: MODELO DE REPRESENTACIÓN DE PERFIL DE USUARIO EN XML	148

PRESENTACIÓN



Estimada comunidad: una Facultad de Ingeniería como la nuestra, genera anualmente una interesante cantidad de conocimiento en base a la investigación, que nuestros académicos realizan, o a sus capacidades de innovación y desarrollo, que se han instalado desde hace un tiempo en nuestro quehacer universitario. Esta producción nos permite presentar una nueva edición de la Revista “Trilogía”, la que sintetiza experiencias, perspectivas y líneas de desarrollo Ingeniero-tecnológico, por donde se encauza la formación de los futuros profesionales UTEM, requeridos por el mercado laboral.

Estamos convencidos que, con esta nueva publicación, establecemos un significativo impulso para fortalecer el trabajo en la **triple hélice I+D+I**, trabajo en el que estamos empeñados para fortalecer el vínculo entre la empresa, la industria y la Universidad Tecnológica Metropolitana. Esto no sólo para enfatizar en las líneas del saber que emprendemos día a día, sino también para difundir una labor que nace en nuestros laboratorios, se robustece

por el análisis crítico y científico de un trabajo en equipo y se revitaliza al ingresar al ámbito productivo nacional, co-ayudando a transferir las nuevas tecnologías y metodologías que el competitivo mercado nacional precisa para seguir innovando y desarrollándose.

Contribuyen en esta ocasión, 26 académicos UTEM y nueve del Centro de Investigaciones Avanzadas Inesc-Brasil, que en 160 páginas sintetizan 12 de los proyectos especializados más emblemáticos en cuanto a desarrollo e innovación en pos de contribuir al diálogo I + D + I, al compartir sus perspectivas, líneas de avance y experiencias desarrolladas.

Con esta nueva edición de la Revista “Trilogía”, de la Facultad de Ingeniería de la UTEM, damos otro paso en difundir el nuevo conocimiento que se genera para beneficio y formación de los futuros titulados UTEM.

Ingeniería somos tod@s

Alejandro Velásquez Soto

Decano
Facultad de Ingeniería

C.J. Artaiz

Red Eléctrica de España, SAU
España

M.I. Docavo

Red Eléctrica de España, SAU
España

P. Cabral

REN
Portugal

N. Martins

REN
Portugal

M.N. Tavares

REN
Portugal

M. Matos

INESC Porto
Portugal

M. Rosa

INESC Porto
Portugal

R. Ferreira

INESC Porto
Portugal

A. Leite da Silva

UNIFEI
Brasil

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES ADECUADOS DE RESERVA DE OPERACIÓN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS IBÉRICOS A MEDIO Y LARGO PLAZO

RESUMEN

En este documento se explican los aspectos más importantes del proyecto de desarrollo e implementación de una herramienta probabilística de cálculo para la planificación de generación, cobertura de demanda y reserva de operación en los sistemas eléctricos ibéricos. El trabajo ha sido llevado a cabo a través de un Proyecto de I+D+I, desarrollado en el ámbito de las actividades de planificación conjunta del MIBEL que realizan REE y REN, con la colaboración de INESC Porto. El desarrollo se ha basado en la aplicación de la metodología de simulación probabilística cronológica de Monte-Carlo, cuyas características fundamentales se exponen a continuación. Asimismo, se describen algunos de los estudios de aplicación adicionales que se han realizado con la herramienta, tales como

el estudio de maximización de producción de potencia de origen renovable, el estudio de alternativas de refuerzo de reserva operacional y el análisis de la influencia de las interconexiones eléctricas entre España y Portugal en la cobertura y reserva del sistema vecino, todos ellos con el objetivo final de facilitar y optimizar la integración de energía renovable de carácter intermitente en los sistemas eléctricos ibéricos sin comprometer la seguridad y calidad del suministro.

Palabras clave: **MIBEL – Generación renovable intermitente – Seguridad de suministro – Cobertura de demanda – Reserva de Operación – LOLE – LORE – Maximización de producción renovable intermitente.**

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos ibéricos se caracterizan por tener un alto grado de penetración, actual y futuro de generación renovable de carácter intermitente. La maximización de la integración de grandes contingentes de generación renovable intermitente así como la minimización de la pérdida o vertido de energía renovable en los períodos de menor demanda constituyen objetivos estratégicos para ambos Operadores del Sistema (REE y REN), que están encuadrados en un ámbito más general de fomento y promoción de la generación eléctrica de origen renovable impulsada por los Gobiernos de ambos países en el marco del cumplimiento de los objetivos establecidos por la UE (Unión Europea) para el año 2020, de forma que en dicho horizonte el 20% del consumo total de energía pueda ser abastecido por fuentes de energía renovable.

En la actualidad, la potencia instalada renovable intermitente (eólica y solar fundamentalmente) en la península ibérica asciende a poco más de 20.000 MW. Esto supone casi el 20% de la potencia instalada total, habiéndose previsto para el año 2020 que la potencia renovable se doblará respecto de la cifra actual, representando del orden del 30% de la potencia instalada total.

La integración a gran escala de generación renovable intermitente tiene numerosas implicaciones en la operación del sistema. Dos de las más importantes son: a) su repercusión en la garantía o seguridad de suministro, relacionada con la disponibilidad del recurso primario; y b), la respuesta del sistema para afrontar las variaciones de generación derivadas de la intermitencia de la generación eólica y solar. En concreto, la gestión de rápidas y fuertes rampas de generación negativa en relación con la demanda y la valoración de la suficiencia de la reserva operacional disponible. En este marco de referencia, la utilidad de los métodos

deterministas y de las metodologías probabilísticas clásicas de cobertura de demanda es insuficiente. De ahí surge la necesidad del desarrollo realizado.

METODOLOGÍA

La metodología seguida en este trabajo consiste en la aplicación del procedimiento de simulación cronológica de Monte Carlo. Es el método más apropiado para realizar los estudios de evaluación de cobertura y reserva operacional, debido a la complejidad de las relaciones entre los diferentes aspectos que componen la evaluación del riesgo en los sistemas generadores en España y Portugal.

Para cada año del horizonte de estudio se define la configuración del sistema eléctrico. Esto es, la demanda eléctrica horaria prevista (8.760 valores), la potencia térmica instalada en el sistema, las series históricas de potencia eólica horaria y las series históricas mensuales necesarias para estimar la potencia hidráulica disponible. Además, se consideran el resto de potencia de régimen especial, los períodos de mantenimiento programado de los grupos y los períodos de fallo y tiempos de reparación de los mismos de acuerdo a sus distribuciones estadísticas y parámetros específicos (ratios de fallo y tiempo medio de reparación). Se puede introducir una incertidumbre asociada a la previsión de demanda horaria, tanto a largo plazo (estudio de cobertura) como a corto plazo (evaluación de reserva operacional).

El modelo desarrollado abarca la evaluación de la cobertura y la reserva operacional, y se compone de cuatro bloques principales: Balances de Potencia, Balances de Energía, Análisis “Well being” y Análisis de Reserva Operacional.

ANÁLISIS DE COBERTURA

La herramienta incluye la determinación de los índices probabilísticos clásicos de fiabilidad de cobertura de demanda que representan el riesgo relacionado con la seguridad del suministro eléctrico. Es decir, el riesgo de no disponer de suficiente capacidad para cubrir la demanda. Estos índices de fiabilidad son los siguientes:

- LOLP: Loss of load probability
- LOLE: Loss of load expectation (h/yr)
- EPNS: Expected power not supplied (MW)
- EENS: Expected energy not supplied (MWh)
- LOLF: Loss of load frequency (yr⁻¹)
- LOLD: Loss of load duration (h)

Los índices de fiabilidad de cobertura anteriores se determinan con resolución anual y/o mensual.

La metodología de cálculo mediante el método cronológico de Monte Carlo, también permite obtener las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias que dan lugar a los valores medios que representan los índices anteriores, lo que supone una gran ventaja en relación a los métodos de cálculo deterministas.

De igual forma, la aplicación de la metodología probabilística permite la determinación de la potencia disponible mensual total y desglosada por tecnología [nuclear, térmica clásica, hidráulica, solar, eólica, resto de renovable (RSI, RSU, Biomasa, etc.), etc.], así como la determinación probabilística del Índice de Cobertura del Sistema, definido como el cociente entre la potencia disponible total y la punta del sistema. Varias variantes probabilísticas del Índice de Cobertura pueden ser calculadas:

- ICPA: Índice de Cobertura en la hora de la punta anual

- ICPM: Índice de Cobertura en la hora de la punta mensual
- ICMIN: Índice de Cobertura mínimo mensual
- ICBPA: Índice de Cobertura del bloque de punta (variable) de la monótona anual
- ICBPM: Índice de Cobertura del bloque de punta (variable) de la monótona mensual

Además, la aplicación de una metodología de “Unit Commitment” simplificada (orden de mérito) permite la estimación no sólo de los balances de energía, sino también del “mix” de generación del sistema, pudiendo estimarse la energía mensual producible total y desglosada por tecnología [nuclear, térmica clásica, hidráulica, solar, eólica, resto de renovable (RSI, RSU, Biomasa, etc.)].

Adicionalmente a las variables probabilísticas anteriormente definidas, el análisis “Well Being” proporciona una evaluación de la fiabilidad del sistema generador conocida como Fiabilidad Preventiva, en la que los estados del sistema se pueden definir de la forma siguiente: estados saludables, marginales o estados de avería o fallo.

Un sistema opera en un estado saludable cuando tiene una reserva de generación suficiente según algún criterio de tipo determinista, tal como la pérdida del grupo disponible de mayor tamaño del sistema. En un estado marginal, a pesar de garantizarse la cobertura de la demanda, el sistema no tiene reserva suficiente para satisfacer un criterio determinista especificado. Asimismo, un estado de avería o fallo se caracteriza por la existencia de una generación disponible inferior a la demanda.

Como resultado del análisis “Well Being”, se obtienen los siguientes índices probabilísticos de fiabilidad preventiva:

- EH: Expected healthy hours (h/yr). Valor esperado del tiempo en el que el sistema se encuentra en estado saludable.

- EM: Expected marginal hours (h/yr). Valor esperado del tiempo en el que el sistema se encuentra en estado marginal.
- FH: Expected frequency healthy states (h-1). Valor esperado de la frecuencia de estados saludables.
- FM: Expected frequency marginal states (h-1). Valor esperado de la frecuencia de estados marginales.
- DH: Expected duration healthy states (h). Valor esperado de la duración de los estados saludables.
- DM: Expected duration marginal states (h). Valor esperado de la duración de los estados marginales.

ANÁLISIS Y VALOR DE RESERVA OPERACIONAL.

En sistemas eléctricos con alta penetración de energía renovable de carácter intermitente, como es el caso de los sistemas ibéricos, el impacto de este tipo de generación fluctuante tiene repercusiones no sólo en la seguridad de suministro y el procedimiento que debe utilizarse para realizar su evaluación, sino que también hay otros impactos, no menos importantes en la operación del sistema, tales como modificaciones en el modo de operación y gestión del equipo generador clásico térmico e hidráulico, la necesidad del sistema de dar respuesta a variaciones rápidas de producción renovable (fundamentalmente eólica) y la capacidad de afrontar fuertes rampas negativas (en relación con la demanda). En definitiva, surge la problemática relacionada con la evaluación de la disponibilidad de reserva suficiente y la determinación de un valor adecuado de la misma, tanto en el presente como de cara al futuro, cuando la penetración de producción renovable intermitente será todavía mayor.

Para hacer frente a este reto es necesario, por una parte, el establecimiento de un criterio

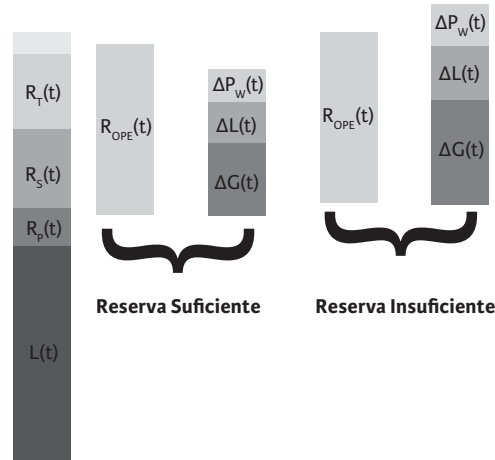
para la definición de la reserva; y por otra parte, el establecimiento de una metodología de evaluación de la idoneidad de esa reserva. En lo que respecta al criterio de definición de la reserva, y dado que la programación del equipo generador se suele realizar con intervalo de cálculo horario, en este proyecto se ha utilizado, como concepto de reserva operacional, aquella reserva que es movilizable en menos de una hora. En lo que se refiere al criterio de evaluación de la misma, es evidente que la reserva operacional debería ser suficiente, en condiciones ideales, para absorber las variaciones de generación/demanda que se producen en menos de una hora y que, en principio, son las siguientes: los fallos fortuitos del equipo generador, la variación de demanda (es decir, el error en la previsión de la demanda) y la variación inesperada de la generación renovable intermitente.

De forma genérica, la reserva existente en un período incluye la reserva disponible de los grupos acoplados en ese período más la potencia disponible correspondiente a la reserva terciaria movilizable en menos de una hora. Y las necesidades de reserva corresponden fundamentalmente a los tres conceptos anteriormente establecidos: variaciones de demanda, variaciones de la generación clásica por fallos fortuitos y variaciones de la producción renovable intermitente (fundamentalmente eólica) en el mismo período.

La definición del valor de la reserva en cada período t requiere el establecimiento de una regla simplificada de acoplamiento de grupos (orden de mérito) que permita al algoritmo de simulación seleccionar los grupos necesarios para cubrir la demanda, la reserva primaria y la reserva secundaria (establecida con criterios deterministas). En la Figura 1 se representa el concepto de evaluación de reserva operacional utilizado en este trabajo. $L(t)$ Demanda eléctrica

$R_p(t)$ Reserva primaria

$R_s(t)$ Reserva secundaria



R_t(t) Reserva terciaria movilizable en menos de una hora

R_{ope}(t) Reserva operacional

ΔG(t) Pérdida de generación

ΔL(t) Variación de carga no prevista

ΔP_w(t) Variación no prevista de generación de origen eólico

Reserva Suficiente

$$R_{ope}(t) \geq \Delta P_w(t) + \Delta L(t) + \Delta G(t)$$

Reserva Insuficiente

$$R_{ope}(t) < \Delta P_w(t) + \Delta L(t) + \Delta G(t)$$

FIGURA 1. CONCEPTO DE EVALUACIÓN DE RESERVA OPERACIONAL.

En cada período t tiene que haber una potencia programada mínima capaz de satisfacer la demanda prevista y las necesidades de reserva primaria y secundaria. Además, y de acuerdo con el criterio de reserva operacional, es necesario identificar la potencia movilizable en menos de una hora. Para definir la necesidad de reserva operacional, la herramienta realiza los siguientes procesos:

- Cálculo probabilístico de pérdida de generación por fallo $\Delta G(t)$, basado en la tasa de fallo fortuita de cada grupo.

- Cálculo de variación de carga no prevista $\Delta L(t)$, basado en la desviación típica de la distribución Gaussiana de error de previsión porcentual de demanda a corto plazo.

- Estimación de la variación de potencia eólica no prevista $\Delta P_w(t)$, mediante el método de persistencia, calculada como la diferencia $\Delta P_w(t) - \Delta P_w(t-1)$.

A partir de estas variables se puede establecer la siguiente comprobación para evaluar la adecuación del valor de reserva de operación en el período t , de una hora de duración.

$$R_{ope} \geq \Delta L + \Delta P_w + \Delta G \quad (1)$$

Con esta expresión, se define el riesgo de que variaciones de carga, de potencia intermitente y de generación no previstas no puedan ser asumidas por la reserva operacional, es decir, por los grupos del equipo generador movilizables en menos de una hora.

Se pueden obtener unas estadísticas del proceso de simulación que permiten obtener diversos índices de idoneidad o adecuación del valor de la reserva de operación, así como su función de distribución de probabilidad. Estos índices son los siguientes:

- LORP: Lack of Reserve Probability
- LORE: Lack of Reserve Expectation (h)
- LORF: Lack of Reserve Frequency (h^{-1})
- LORD: Lack of Reserve Duration (h)
- Valor esperado de las necesidades de reserva

Con este análisis de reserva de operación se obtiene un criterio de valoración de la misma mediante metodología probabilística, a través de estos índices proporcionados por la herramienta, con resolución anual y mensual.

RESULTADOS

En la TABLA I se muestra la previsión de evolución de la potencia instalada en los sistemas eléctricos de España y Portugal a lo largo del horizonte de estudio 2008-2010.

En la Figura 2 se muestran los índices de cobertura (LOLE) y reserva operacional (LORE), a lo largo del período de estudio en ambos sistemas eléctricos, para el escenario más pesimista considerado, es decir año hidráulico seco, de baja eolicidad y alta concentración de mantenimientos de los grupos generadores.

TABLA I. EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA EN ESPAÑA Y PORTUGAL.

Potencia Ne ta Instalada (GW)	España				Portugal			
	2008	2010	2015	2020	2008	2010	2015	2020
Térmica	50,8	53,3	57,8	66,5	5,8	6,2	6,8	8,2
Bom beo Puro	2,7	2,7	3,9	5,4	0,2	0,2	0,7	0,7
Hidráulica	18,1	18,3	18,8	19,6	4,8	4,8	5,7	6,5
Eólica	16	20	30	40	2,7	4,1	4,9	5,2
Solar	1,5	2,5	5	7,5	-	-	-	-
Resto Renovable	1,1	1,5	2,5	3,5	1,7	2,1	2,6	3,1
Total	90,2	98,3	118,0	142,4	15,2	17,5	20,6	23,8
Punta de demanda	47,5	50,2	59,3	70,6	9,6	10,4	12,7	15,1

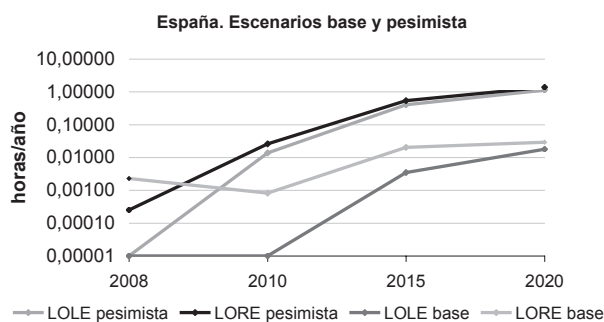


FIGURA 2(A). ESPAÑA. LOLE Y LORE.

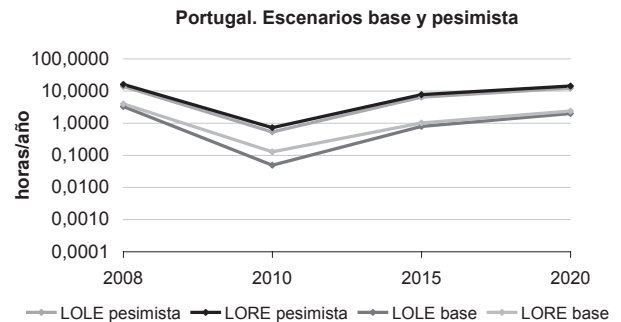


FIGURA 2(B). PORTUGAL. LOLE Y LORE.

ESTUDIOS DE APLICACIÓN

La herramienta desarrollada ha sido utilizada no sólo para evaluar la idoneidad de las configuraciones de generación futuras de los sistemas eléctricos ibéricos, a efectos de cobertura y reserva de operación, sino también para realizar diversos estudios de aplicación, entre los que cabe subrayar, por su importancia específica, los tres que figuran a continuación.

MAXIMIZACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ORIGEN RENOVABLE INTERMITENTE

La maximización de la producción de origen renovable es un objetivo estratégico para los dos Operadores del Sistema de la península ibérica; en este contexto, en concreto, la minimización del vertido de energía renovable constituye una importante preocupación para ambos TSO ibéricos; todo cuando se dan simultáneamente situaciones hidrológicas húmedas con rachas o períodos de alta generación eólica.

Para evaluar la probabilidad de vertido renovable se parte de un orden de mérito predeterminado, que incluye la definición de unos requisitos mínimos de acoplamiento permanente de grupos térmicos (MIT)¹ que garanticen el sincronismo del sistema generador y cualquier otro requisito o restricción operacional, como la obligación de consumo, quemado de ciertos combustibles o cualquier otra restricción de operación, por ejemplo el mantenimiento de una carga constante en ciertos grupos térmicos.

La base del diagrama de cargas la ocupa este MIT y un conjunto de tecnologías de generación que, por su propia naturaleza, es difícilmente gestionable, tales como la cogeneración, las plantas de combustión de biomasa, residuos sólidos urbanos (RSU) y de residuos sólidos industriales (RSI), así como por la generación

renovable intermitente no gestionable: solar, eólica e hidráulica fluyente.

El vertido de generación renovable se determina por comparación entre la demanda más los consumos en bombeo (que ayudan a aumentar artificialmente la carga con objeto de maximizar la penetración renovable en las horas de valle) y el conjunto de bloques del orden de mérito situados en la base del diagrama de cargas, anteriormente mencionados.

Para identificar el valor esperado de vertido de generación renovable, se determina el Factor de Utilización (Fu), calculado como el cociente entre la potencia media realmente producida y la potencia media disponible teórica de cada tecnología de carácter intermitente, así como la probabilidad de vertido.

La TABLA II presenta la estimación de vertido de renovable en los sistemas eléctricos ibéricos para el año 2008, en condiciones hidrológicas medias y con la máxima utilización posible del equipo de bombeo.

¹ MIT: Mínimo de Inercia Térmica (MW): Valor de potencia térmica mínima necesaria para garantizar el sincronismo del sistema generador y otras restricciones operacionales.

TABLA II BASE DEL DIAGRAMA DE CARGAS PARA ORDEN DE MÉRITO EN ESPAÑA Y PORTUGAL

Orden Mérito	España 2008			
	Potencia			
	Asignada	Disponible	FU	Vertido
	MW	MW	%	%
Hidráulica Fluyente	1.747	1.767	98,9%	1,1%
Eólica	4.027	4.031	99,9%	0,1%
Térmica no gestionable*	3.844	3.844	100%	0%
Mini-hidráulica	462	462	100%	0%
MIT	12.106	12.106	-	-

Orden Mérito	Portugal 2008			
	Potencia			
	Asignada	Disponible	FU	Vertido
	MW	MW	%	%
Hidráulica Fluyente	990	991	100%	100%
Térmica no gestionable*	612	612	100%	100%
Eólica	662	662	100%	100%
Mini-hidráulica	99	99	100%	100%
MIT	420	420	-	-

* COMPUESTA POR RENOVABLE (BIOMASA, RSU Y RSI) Y NO RENOVABLE (COGENERACIÓN)

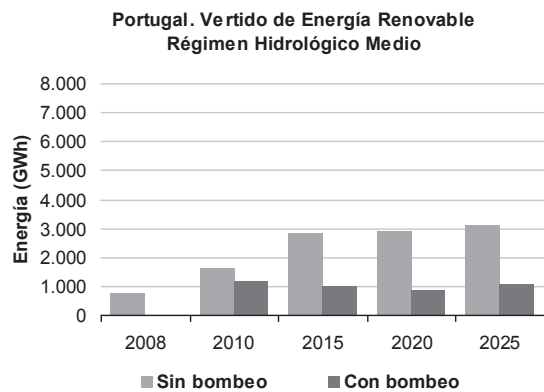
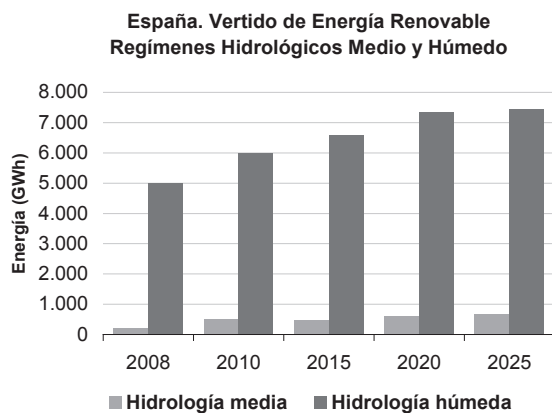


FIGURA 3. RIESGO DE VERTIDO DE ENERGÍA RENOVABLE EN ESPAÑA Y PORTUGAL

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOLUCIONES ALTERNATIVAS DE REFUERZO DE COBERTURA Y RESERVA OPERACIONAL.

Se trata de un estudio técnico-económico que permite analizar los resultados de cobertura y la evaluación de necesidades de reserva de operación y la sensibilidad de los mismos antes diferentes configuraciones del parque generador. El estudio se realiza por comparación entre una configuración básica futura del parque generador y varias configuraciones alternativas de refuerzo, que consisten en la adición de potencia correspondiente a diferentes alternativas: centrales de bombeo, ciclos combinados a gas natural (CCGT) o turbinas de gas natural en ciclo abierto (OCGT). Cada una de las alternativas viene caracterizada por un coste fijo de inversión, unos costes variables de generación y un tiempo estimado de vida útil de cada instalación. También se considera la utilización anual más probable de cada tecnología y una estimación de los beneficios económicos por venta de energía en el mercado mayorista de generación.

Para cada una de las alternativas (configuración base y soluciones alternativas de refuerzo) se calculan los índices de fiabilidad de cobertura y reserva asociados (LOLE, EENS, LORE, etc.), de manera que se pueden caracterizar los beneficios de cada una de las configuraciones propuestas, en términos de disminución de riesgo de cobertura, idoneidad de reserva y vertido de energía renovable evitado (en caso de adición de bombeo), en relación con los costes incurridos en cada opción de refuerzo (Análisis “Trade – off”).

TABLA III. DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO DE RESERVA. ESPAÑA Y PORTUGAL.

Variables Consideradas	Soluciones alternativas de reserva		
	Bombeo	OPCT	CCGT
Coste de inversión (€2007/kW)	630	300	410
Coste de inversión total (M€2007)	252	120	164
Vida útil	50	20	25
Coste variable de generación (€2007/MWh)	32/10	65	45
Utilización anual	500/800	500/800	3.200/4.000

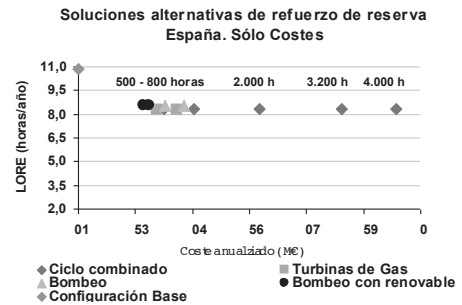


FIGURA 4(A) ESPAÑA. ANÁLISIS COSTES DE LAS ALTERNATIVAS DE REFUERZO DE RESERVA

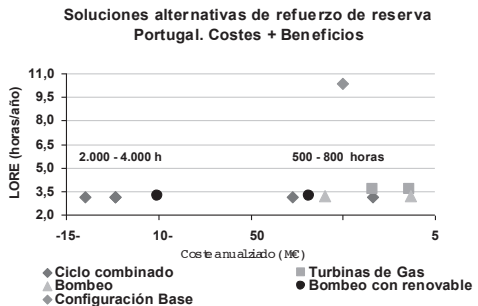


FIGURA 4(B) PORTUGAL. ANÁLISIS COSTES Y BENEFICIOS DE LAS ALTERNATIVAS DE REFUERZO DE RESERVA

La Figura 4 refleja los resultados del estudio comparativo de soluciones correspondiente a una configuración hipotética del año 2015 de ambos sistemas ibéricos, y tres soluciones alternativas de refuerzo de 400 MW de las diferentes tecnologías analizadas. En el caso de España, se muestra la solución “sólo costes”, mientras que en el caso de Portugal se refleja la solución “costes + beneficios”. Todas las soluciones propuestas de refuerzo de reserva son equivalentes en el intervalo de utilización anual comprendido entre 500 y 800 horas.

En el caso de bombeo con renovable, los resultados representados en la Figura 4 corresponden a la hipótesis de valorar el coste variable de generación del bombeo a 10 €/MWh.

La tecnología CCGT produce un aumento en los parámetros de idoneidad de reserva de operación, a pesar de su carácter no movilizable a muy corto plazo, debido a que al estar situada en un bloque más bajo del orden de mérito libera potencia disponible de otras tecnologías movilizable (hidráulica), que contribuyen a la mejora de los parámetros de reserva.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS INTERCONEXIONES INTERNACIONALES IBÉRICAS EN LA COBERTURA DE LA DEMANDA DEL SISTEMA ELÉCTRICO PENINSULAR ESPAÑOL Y DEL CONTINENTAL PORTUGUÉS.

El objetivo de este estudio es la comparación entre los resultados de cobertura y reserva operacional de cada sistema ibérico considerado de forma aislada y los correspondientes, teniendo en cuenta la colaboración del sistema ibérico vecino.

La interconexión entre España y Portugal se modeliza en la herramienta probabilista como un grupo generador ficticio equivalente de potencia variable cuyos parámetros de fiabilidad (número y duración de averías) son semejantes a los de las

líneas de interconexión que unen ambos sistemas eléctricos. La estimación de la potencia variable que aporta este grupo ficticio se realiza a partir de la simulación probabilística de cobertura de cada sistema, determinándose la potencia disponible sobrante de cada uno. Este valor es minorado en una cantidad en concepto de reserva propia no exportable (“system services reserve”). La cifra de esta potencia disponible sobrante minorada es el valor teóricamente exportable al sistema vecino, que finalmente se compara con la capacidad comercial de la interconexión. El mínimo resultante se incorpora como un grupo generador ficticio en el sistema vecino como se ve en la Figura 4, en los dos sistemas ibéricos aumenta el índice de fiabilidad LOLE cuando se tienen en cuenta las interconexiones, sobre todo en el sistema portugués debido al distinto tamaño de ambos sistemas en relación con la capacidad comercial de interconexión y a la sensible diferencia en el valor de partida de dicho parámetro en ambos sistemas, considerados de forma aislada.

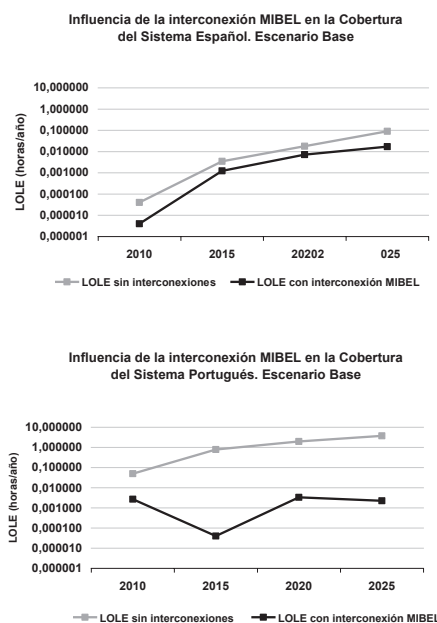


FIGURA 4. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA LOLE CONSIDERANDO INTERCONEXIONES INTERNACIONALES IBÉRICAS.

CONCLUSIONES

Los métodos determinísticos tradicionales utilizados para estudios de niveles de reserva son insuficientes para analizar correctamente el impacto de la generación renovable de carácter intermitente en los sistemas eléctricos. La herramienta probabilística propuesta para la evaluación de cobertura y reserva operacional es capaz de evaluar el riesgo de insuficiencia de reserva en los sistemas eléctricos ibéricos caracterizados por gran penetración de generación renovable de carácter intermitente. Se definen índices probabilísticos para la evaluación del impacto de diferentes configuraciones del sistema eléctrico. Además, se realizan estudios de aplicación con la herramienta de simulación que permiten obtener conclusiones de cara a la planificación de los sistemas ibéricos a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

1 Carlos J. Artaiz Wert, “Gestión de la generación fluctuante en la valoración del índice de cobertura y de la reserva requerida en el Sistema Eléctrico Peninsular Ibérico”, Jornadas Técnicas 2008 CIGRÉ ESPAÑA, Nov. 2008.

2 J.A. Peças Lopes, M.A. Matos, P.H. Gomes Cabral, M.P. Sampaio Ferreira, N.M. Fidalgo Martins, C.J. Artaiz Wert, F. Soto Martos, R. López Sanz, M. Rosa, R. Ferreira, A.M. Leite da Silva, Warley Sales, Leonidas Resende, Luiz Manso, “Dealing with intermittent generation in the long-term evaluation of system adequacy and operational reserve requirements in the Iberian Peninsula”, C1–304. CIGRÉ, Ago. 2008.

Víctor Parada Daza

*Doctor en Ciencias de la Ingeniería de
Sistemas y Computación*
USACH

Héctor Pincheira Conejeros

Magíster en Ingeniería Informática
UTEM

Ricardo Corbinaud Pérez

Magíster en Ingeniería Informática
UTEM

MODELO CONSTRUCTIVO-EVOLUTIVO PARA EL RCPSP

RESUMEN

El RCPSP (ResourceConstrained Project Scheduling Problem) o problema de la planificación de actividades con restricciones de orden temporal y de recursos, constituye un modelo general de enorme trascendencia en el campo de la optimización combinatoria, que tiene por objetivo minimizar el tiempo máximo de duración total de un proyecto y que ha sido abordado con métodos tanto exactos como heurísticos. Aunque no garantizan la obtención de una solución óptima, los algoritmos heurísticos pueden entregar resultados satisfactorios en tiempos considerablemente inferiores a los demandados por las técnicas analíticas exactas. Como propuesta de solución al RCPSP, presentamos un modelo Constructivo-Evolutivo, resultante de la combinación de las capacidades de los modelos constructivos y la potencialidad de los algoritmos genéticos.

Palabras clave: **RCPSP, Scheduling, Métodos Heurísticos, Optimización Combinatoria.**

INTRODUCCIÓN

Los problemas de optimización combinatoria tienen como objetivo optimizar una determinada función, sujeta a un conjunto de restricciones. El conjunto de las soluciones posibles es, por lo general, extremadamente grande debido a una explosión combinatoria resultante de las muchas formas distintas de disponer los elementos básicos que conforman las soluciones.

Tal es el caso del problema de la planificación temporal de actividades bajo restricciones de precedencia y disponibilidad de recursos, más conocido como RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem), el cual ha motivado grandes discusiones de tipo matemático y mantiene un interés permanente por contribuir con propuestas de solución cada vez mejores.

El RCPSP consiste en programar de manera óptima un conjunto de n actividades, bajo relaciones de precedencia y limitación de recursos.

Algunas de las características de este problema son las siguientes:

- Las actividades no pueden ser interrumpidas una vez que han comenzado a ejecutarse.
- No existen plazos imperativos de término de las actividades. Es decir, no se pueden establecer a priori sus tiempos de finalización.
- Para cada actividad existe un único modo de operación. O sea, no es posible reducir su tiempo de ejecución asignando recursos adicionales.
- Es posible la ejecución simultánea de ciertas actividades.

La formalización del problema requiere definir los siguientes conjuntos:

$N = \{i / 0 \leq i \leq n + 1\}$, actividades entre las cuales la 0 y la $n+1$ son ficticias.

$D = \{d_i / 0 \leq i \leq n + 1 \wedge d_i \geq 0\}$, duraciones de las actividades.

$P_i = \{\text{predecesoras inmediatas de la actividad } i\}$
 $R = \{R_k / 1 \leq k \leq m \wedge R_k \geq 0\}$, disponibilidades de cada uno de los m tipos de recursos.

$r_i = \{r_{ik} / 1 \leq k \leq m\}$, unidades de cada recurso R_k requeridas por la actividad i .

$F = \{F_i / 1 \leq i \leq n\}$, tiempos de término de todas las tareas, clave para la minimización del tiempo total de ejecución del proyecto.

$A(t) = \{i \in N / F_i - d_i \leq t < F_i\}$, tareas activas en un instante t .

El problema así definido se puede expresar (Christofides, Alvarez-Valdez and Tamarit, 1987) como sigue:

$$\text{Minimizar } F_{n+1}, \text{ sujeto a} \quad (1)$$

$$F_h \leq F_i - d_i \quad i = 1, \dots, n+1; h \in P_i \quad (2)$$

$$\sum r_{ik} \leq R_k \quad i \in A(t) \wedge R_k \in R \quad (3)$$

$$F_j \geq 0 \quad (4)$$

La función objetivo (1) consiste en minimizar el tiempo de finalización de la última actividad del proyecto. Es decir, el tiempo total del proyecto (makespan). La restricción (2) establece las relaciones de precedencia entre las actividades. La restricción (3) valida que, en cada instante t , la cantidad de recursos utilizados por las actividades en ejecución no supere la disponibilidad máxima. Finalmente, la restricción (4) define las variables de decisión.

De la preocupación por resolver más óptimamente el RCPSP, han surgido dos categorías de métodos: los exactos y los heurísticos. Los métodos exactos intentan encontrar una solución óptima y demostrar que esa solución es la óptima global. Pero, el tiempo invertido por un método exacto para encontrar la solución óptima de un problema difícil, si es que existe tal método, es de un orden de gran magnitud, pudiendo, incluso, llegar a ser inaceptable.

Para resolver de manera exacta el RCPSP, se han diseñado diversos algoritmos basados en técnicas tales como: Branch and Bound, Relajación Lagrangiana y Programación Dinámica (Gorenstein, 1972; Fisher, 1973; Stinson, Davis and Kjumawala, 1978; Talbot and Patterson, 1978; Patterson, 1984; Christofides, Alvarez-Valdez and Tamarit, 1987; Demeulemeester, 1992; Mingozzi, Maniezzo, Ricciardelli and Bianco, 1995; Simpson and Patterson, 1996; Brucker and Knust, 2000; Dorndorf, Peschand Phan-Huy, 2000; Erenguc, Ahnand Conway, 2001, entre otros).

La naturaleza combinatoria del RCPSP conlleva su inherente intratabilidad y consecuente pertenencia a la clase NP-duro (Blazewicz, Lenstra and Rinnooy Kan, 1983). De otra manera, la inexistencia de limitación de recursos reduciría este problema a un caso de CPM (Critical Path Method) el cual puede resolverse en tiempo polinomial (Elmaghraby, 1977).

Revisando sólo una parte del dominio, los métodos heurísticos proporcionan buenas soluciones en breve tiempo computacional, aunque no necesariamente las óptimas (Osman and Kelly, 1996). Estos métodos proveen un marco general para la creación de algoritmos híbridos basados en la combinación de diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica, la comunicación química entre animales y la formulación estadística.

Así, es posible advertir un cúmulo de recientes contribuciones a la solución del RCPSP, entre las cuales se destacan los métodos heurísticos basados en reglas de prioridad (Xu, McKee, Nozick and Ufomata, 2008). Una regla de prioridad define un procedimiento para seleccionar una entre un conjunto de actividades elegibles (Ballestín, 2002). Estas reglas se han probado con algoritmos genéticos, tabu search, simulated annealing, colonias de hormigas, búsqueda local y parallel SGS (Schedule Generation Scheme) (Hartmann and Kolisch, 2006).

Buenos resultados han entregado los algoritmos de optimización por colonias de hormigas (ACO), combinando dos métodos de evaluación de feromona (Merkle, Middendorf and Schmeck, 2002) o integrándolos a una metaheurística híbrida denominada ANGEL (Ant colony optimization, Genetic algorithm and Local search strategy) (Tseng and Chen, 2006). ACO provee la población inicial para un algoritmo genético que, actualizando el feromona, obtiene una solución mejorada; luego, ambos algoritmos intervienen alternada y cooperativamente para generar una solución a partir de la cual una búsqueda local eficiente produce una solución final de mejor calidad.

La justificación técnica generalmente utilizada para encauzar procesos de búsqueda en conjuntos de secuencias activas y para reducir la duración de secuencias al interior de grafos (Ballestín, 2002), ha sido incorporada

en 22 diferentes algoritmos (Valls, Ballestín and Quintanilla, 2005), 15 de los cuales usan justificación doble, reportando importantes mejoras en los resultados sin aumentar los tiempos de cómputo. Por otra parte, el HGA (Hybrid Genetic Algorithm) (Valls, Ballestín and Quintanilla, 2008), usa un operador de cruzamiento exclusivo para el RCPSP y un operador de justificación doble destinado a la mejora local de todas las soluciones generadas.

No menos importante ha sido el denominado algoritmo genético self-adapting, para el cual tanto la solución del problema como el algoritmo mismo son objetos del proceso de optimización genética (Hartmann, 2002). Meritorio también es el aporte del método de optimización basado en la permutación de enjambres de partículas para el RCPSP (Zhang, Li and Tam, 2006) y de las variaciones denominadas estrategia del límite inferior y estrategia de la duración mínima, ambas destinadas a mejorar la eficiencia de los algoritmos tabu search y simulated annealing (Moreno, Díaz, Pena and Rivera, 2007).

En las publicaciones revisadas se advierte una marcada tendencia al uso de métodos híbridos para resolver eficientemente el RCPSP. Y como una de las principales dificultades inherentes al problema del scheduling radica en factibilizar el espacio de búsqueda, parece razonable optar por navegar siempre a través de espacios factibles constructivos.

Por lo tanto, en este trabajo nosotros experimentamos con una hibridización entre las estrategias constructivas y los algoritmos evolutivos. Para ello, se formaliza el modelo híbrido constructivo-evolutivo propuesto (sección 2), se describen aspectos de representación necesarios para su implementación (sección 3) y se comprueba la efectividad del modelo mediante el análisis de los resultados de una experiencia computacional (sección 4).

MODELO HÍBRIDO CONSTRUCTIVO-EVOLUTIVO

El modelo propuesto constituye un híbrido que combina las características constructivas de los grafos and/or y los conceptos evolutivos de los algoritmos genéticos (Pearl, 1984; Goldberg 1989).

• Métodos constructivos

Los métodos constructivos generan, de manera incremental, la solución de un problema, enumerando implícitamente el dominio de las soluciones factibles debido a lo cual, generalmente, requieren de un gran esfuerzo computacional, tanto en espacio como en tiempo. Un método constructivo opera realizando una búsqueda de la mejor solución sobre un grafo que representa constructivamente el conjunto de soluciones factibles de cierto problema. En cada paso, el método selecciona el mejor de los nodos mediante una función de evaluación $f(n)$ aplicada sobre cada nodo n (Pearl, 1984). Al nodo seleccionado se le aplica alguna regla (preestablecida y adecuada a la representación del problema) de generación de nodos descendientes. Así, nuevamente se está en condiciones de evaluar y continuar repitiendo el proceso hasta encontrar la solución del problema, que no es otra que un camino en el grafo construido, el cual se caracteriza por ser acíclico y dirigido. Cada nodo de este grafo representa un estado y pertenece a un camino que constituye una potencial solución del problema. La función de evaluación está compuesta por las funciones $g(n)$ y $h(n)$ que corresponden, la primera, al costo de generación del nodo, y la segunda, a una estimación del costo futuro en el cual se ha de incurrir para alcanzar un estado meta a partir del nodo inicial (Gómez and Parada, 1996).

• Algoritmos evolutivos

La teoría de la evolución de Darwin, el selecciónismo de Weismann y la genética de Mendel,

confluyen en un conjunto de argumentos que actualmente configuran el paradigma del neodarwinismo, para el cual la vida en el planeta es el resultado de tres procesos que operan sobre las especies, a saber: la selección, la reproducción y la mutación (Kolisch and Hartmann, 1999).

La ciencia de la computación concibió la evolución como un proceso de optimización que podía simularse y dar apoyo a la solución de problemas de ingeniería en los cuales se debe optimizar el uso de recursos escasos. La idea fundamental de este proceso consiste en evolucionar una población de posibles soluciones para un problema dado, usando operadores inspirados en la variación genética y en la selección natural. La evolución es, en efecto, un método de búsqueda entre una inmensa cantidad de «soluciones» posibles. En el ámbito biológico, el enorme conjunto de posibilidades está dado por una colección de potenciales secuencias genéticas, y las soluciones deseables son los organismos altamente aptos. Es decir, los organismos mejor dotados para sobrevivir y reproducirse en su ambiente.

Actualmente existen tres vertientes derivadas de los principios del neodarwinismo: las estrategias evolutivas, la programación evolutiva y los algoritmos genéticos. Conjuntamente, a estas técnicas se les denomina computación evolutiva.

Un individuo es una potencial solución a un determinado problema. Un conjunto de individuos se denomina población. La aptitud individual se evalúa mediante una función que indica lo adecuado que es el individuo (es decir, la solución al problema) con respecto a los demás. Usualmente, la función aptitud es igual a la función objetivo del problema.

• **Bases para el modelo híbrido**

Un grafo and/or es un grafo en el cual cada par de nodos se conecta mediante un arco and, o bien mediante un arco or. Consecuentemente con el método de descomposición de un problema, un grafo and/or puede utilizarse como estrategia de solución de la siguiente manera: el nodo de inicio corresponde a la especificación del problema original, en tanto los nodos restantes representan los respectivos subproblemas (Pearl, 1984). Los arcos and establecen una relación de descomposición, los arcos or una relación de descomposición opcional, como se puede observar en la Figura.1. Para resolver un problema descompuesto de esta forma, las soluciones de los subproblemas se van agregando mediante reglas de descomposición inversa.

Una solución al RCPSP es un camino, en el correspondiente grafo and/or, entre el nodo inicial y el nodo final del proyecto. Una importante ventaja de esta representación radica en la independencia de las actividades potencialmente ejecutables en paralelo.

Los métodos constructivos actúan en el dominio de los caminos a las soluciones óptimas, es decir, comienzan con un estado elemental inicial y generan estados parciales que constituyen un camino que puede, o no, conducir a un estado meta con carácter de solución óptima. En cambio, los métodos evolutivos exploran el dominio de las soluciones manteniendo, en todo momento, una o varias soluciones finales, y para encontrar respuestas de mejor calidad, aplican operadores que modifican las soluciones actuales para obtener otras nuevas.

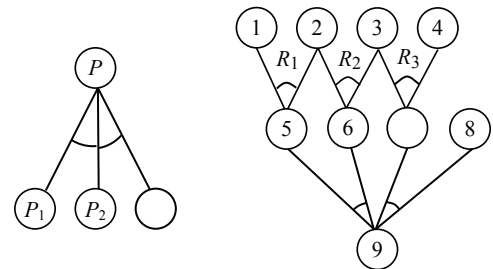


FIGURA 1. DOS EJEMPLOS DE GRAFO AND/OR

En el contexto del RCPSP, una población de individuos coexiste en un determinado entorno con recursos limitados. La competición por los recursos provoca la selección de aquellos individuos mejor adaptados a ese entorno, los cuales se combinan para lograr el cruzamiento de nuevos individuos y la mutación de ciertas características de sus progenitores. Los nuevos individuos pasan a competir por su supervivencia y, con el paso del tiempo, esta selección natural provoca el incremento en la "calidad" de los individuos de la población.

• **Algoritmo constructivo-evolutivo**

Para la construcción de caminos a las soluciones, se contempla el uso de cuatro conjuntos (poblaciones). El primero incluye la configuración inicial de una instancia del problema; el segundo contiene todos los estados parciales derivados de una selección de elementos; el tercero incluye una selección de estados parciales desde los derivados de una selección de elementos; el cuarto, de carácter elitista, contiene aquellos estados parciales correspondientes a las mejores construcciones logradas, las cuales son candidatas a formar parte de una solución.

Existe un ciclo generador de soluciones, que se repite hasta cumplir algún criterio de término, en el cual se seleccionan y combinan estados pertenecientes a los cuatro conjuntos. La combinación se realiza mediante operadores constructivos de cruzamiento y mutación.

La estrategia de utilizar conjuntos de construcciones parciales y operadores evolutivos pretende recorrer sólo parte del espacio de búsqueda que recorrería un método constructivo puro, expandiendo exclusivamente las construcciones candidatas a formar parte de una solución de buena calidad.

La Figura 2a) muestra un espacio de búsqueda generado por un método constructivo puro; en cambio, la Figura 2b) muestra el dominio generado por el método propuesto. En virtud de los antecedentes expuestos, el modelo híbrido constructivo-evolutivo se materializa en el algoritmo presentado.

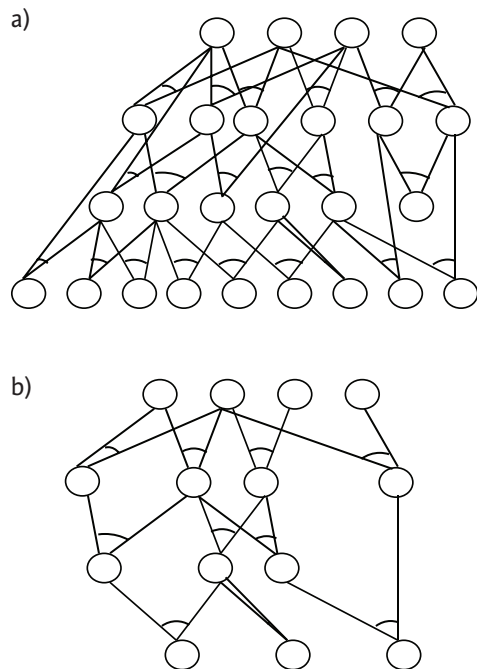


FIGURA 2. ESPACIO DE BÚSQUEDA: A) MÉTODO EXHAUSTIVO Y B) MÉTODO PROPUESTO

Algoritmo constructivo-evolutivo

Inicio

$E \leftarrow$ conjunto de todos los estados elementales
 $A(0) \leftarrow$ selección probabilística de elementos de E según $f(e_i)$
 $B(0) \leftarrow \Phi$
 $t = 0$

Repetir

$t = t+1$
 $C \leftarrow \Phi$
 [1] $A'(t) \leftarrow$ selección desde $A(t)$ según $f(a_i) = g(a_i) + h(a_i) \forall a_i \in A(t)$
 [2] $C \leftarrow$ cruzamiento y mutación entre $A'(t)$ y E
 [3] $C \leftarrow$ cruzamiento entre $A'(t)$ y $A(t)$
 [4] $C \leftarrow$ cruzamiento y mutación entre $A'(t)$ y $B(t)$
 [5] Evaluar $f(c_i) = g(c_i) + h(c_i) \forall c_i \in C$
 [6] $B(t+1) \leftarrow$ actualización mediante elección determinística de individuos de C
 [7] $A(t+1) \leftarrow$ selección probabilística de mejores individuos de C según $f(c_i)$
Hasta cumplir criterio de término

Fin

Las poblaciones utilizadas por el algoritmo Constructivo-Evolutivo en cada etapa, cumplen las funciones que a continuación se detallan:
 E : Conjunto de estados elementales de cualquier solución del problema.
 $A(t)$: Conjunto de construcciones parciales.
 $A'(t)$: Conjunto de los mejores individuos seleccionados desde $A(t)$.
 $B(t)$: Conjunto de las mejores construcciones sobrevivientes hasta la t -ésima iteración.
 C : Conjunto de las construcciones parciales resultantes de reproducir y mutar elementos de $A'(t)$ con E , $A(t)$ y $B(t)$.
 $A(t+1)$: Conjunto de los mejores individuos seleccionados probabilísticamente desde C .
 $B(t+1)$: Conjunto de elementos elegidos determinísticamente desde C .

La cardinalidad de los conjuntos A y B puede variar mientras se ejecuta el algoritmo, pero se debe preestablecer un tamaño máximo dependiente de la instancia del problema a resolver. La cardinalidad del conjunto C puede determinarse a partir del número de sucesores resultantes del proceso de combinación. Al finalizar la ejecución, las soluciones deben encontrarse en el conjunto B. Alternativamente, B puede mantener los mejores candidatos a ser progenitores de nuevas construcciones. El criterio de selección aplicado para actualizar B debe considerar las características propias de la instancia del problema, pues un buen candidato a progenitor en un instante t no necesariamente es bueno en el instante $t+1$. Luego, podría ocurrir que, al cumplirse el criterio de término, B no contenga las soluciones. Por eso, se recomienda usar una variable independiente que almacene, en todo momento, la mejor solución obtenida.

El progreso de la construcción de elementos del conjunto $A(t+1)$ depende principalmente de los criterios de selección definidos. Es decir, si éstos son adecuados, se evita que el algoritmo se entrampe en óptimos locales de mala calidad. Cuando el conjunto B no se ocupa, es decir cuando $B(t+1) \leftarrow \Phi \forall t$, el modelo se comporta como un algoritmo genético, salvo que las poblaciones no sean de soluciones finales, sino de estados parciales.

Con el avance del proceso van surgiendo construcciones potencialmente válidas como soluciones parciales al problema, las cuales se evalúan mediante la función $f(x) = g(x) + h(x)$.

• **Convergencia para el algoritmo constructivo-evolutivo**

Dado que el algoritmo contempla reglas de transformación de carácter constructivo, la evolución de los elementos del conjunto $A(t+1)$ es de naturaleza incremental, es decir, en cada iteración sus elementos se van aproximando a una solución factible.

Si dos estados parciales generan uno o más estados parciales nuevos, entonces el operador de cruzamiento será de carácter constructivo. Luego, los descendientes son estados más evolucionados que sus progenitores, es decir, más cercanos a una solución. De igual manera, la modificación producida por mutación es de carácter constructivo, ya que implica la inserción de un nuevo elemento en un estado parcial.

Las instancias de selección definidas, sin importar cuales sean, actúan sobre estados parciales, por lo cual sólo influyen en la velocidad de convergencia y no afectan la tendencia evolutiva de esos estados a estados solución.

Los operadores de selección, cruzamiento y mutación permiten asegurar que la solución al problema estudiado existe y puede representarse como un grafo finito de estados, de manera que el algoritmo converge a una solución en un número finito de iteraciones (Pearl 1984).

ADAPTACIÓN DEL RCPSP AL MODELO CONSTRUCTIVO-EVOLUTIVO

Aspectos atinentes a la implementación hacen necesario adaptar el modelo general del RCPSP a las características de definición del algoritmo constructivo-evolutivo.

• **Representación de una construcción parcial**

Según el modelo general del RCPSP, cada tarea se puede concebir como una estructura $(m+1)$ -dimensional, donde m indica el número de tipos de recursos requeridos, y la dimensión restante, la duración de la actividad. Una construcción parcial corresponde a la planificación de algunas actividades del proyecto. La Figura 3 muestra la representación tridimensional de una construcción parcial con cinco tareas y dos tipos de recursos. Pero, aunque la duración de cada tarea y los recursos que necesitan sean datos fijos, la representación gráfica de una

construcción parcial se complica cuando la cantidad de tipos de recursos es mayor que dos.

No obstante, si se respetan las restricciones de precedencia y de recursos, es posible representar una planificación en tan sólo dos dimensiones, de modo que se observe la relevancia del tiempo de inicio de cada actividad. Por lo tanto, una construcción parcial será válida si se muestran los tiempos de inicio de las tareas en una representación gráfica bidimensional que, implícitamente, respete las restricciones de precedencia y de recursos.

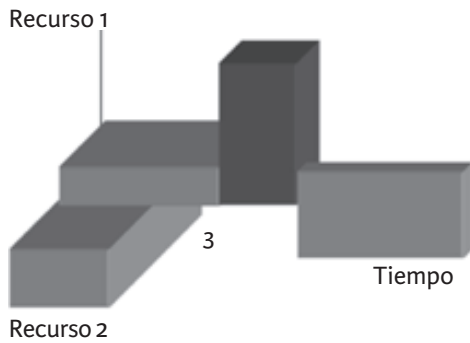


FIGURA 3. CONSTRUCCIÓN PARCIAL CON 5 TAREAS Y 2 TIPOS DE RECURSOS.

• Política de construcción

La elección de una tarea a insertar en una construcción parcial exige comprobar la previa planificación de aquellas que la preceden. Esto implica establecer un tiempo de inicio menor, es decir, lo más pronto posible. A su vez, el tiempo de inicio menor se determina a partir del tiempo de inicio mayor, o sea, el mayor tiempo de término de todas las tareas precedentes. Luego, se puede calcular el tiempo de término menor, como el tiempo de inicio menor más la duración de la tarea.

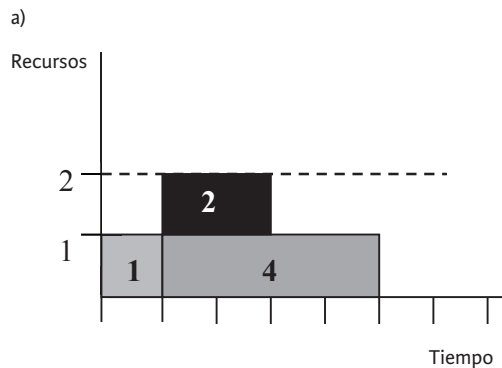
Seguidamente, se deben verificar las restricciones de recursos. Si los recursos son insufi-

cientes, el tiempo de inicio menor de la tarea seleccionada se aumenta progresivamente hasta que existan recursos disponibles. Así, al insertar una tarea en una construcción parcial, se tiene la certeza de cumplir con el menor tiempo de inicio que permita la restricción de recursos.

La Tabla 1 muestra un ejemplo de proyecto simple, de cinco tareas, con sus duraciones, necesidades de recursos (de tan sólo dos unidades disponibles) y relaciones de precedencia. Suponemos, además, una construcción parcial como la descrita en la Figura 4. Si, para continuar la construcción, se elige la tarea 3, su tiempo de inicio mayor debiera ser el término de la tarea 2 (restricción de precedencia), como se aprecia en la Figura 4. Sin embargo, por no haber en ese instante disponibilidad del recurso, la tarea 3 debe posponerse según su tiempo de inicio menor, como se aprecia en la Figura 4.

TABLA 1. DEFINICIÓN DE TAREAS DE UN PROYECTO RECURSOS.

Tarea	Duración	Recurso	Preced.
1	1	1	--
2	2	1	1
3	2	2	2
4	4	1	1
5	1	1	3,4



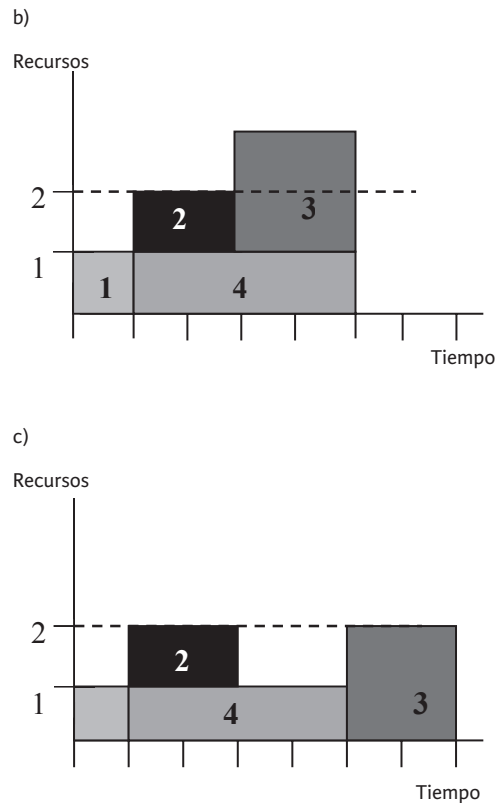


FIGURA 4. POLÍTICA DE CONSTRUCCIÓN

• **Función de evaluación**

El método tiene cierta similitud con el algoritmo A*, pues, a medida que el proceso de planificación avanza, van surgiendo construcciones virtualmente válidas como soluciones parciales al problema, las cuales se evalúan de acuerdo con $f(x)=g(x)+h(x)$, donde la función $g(x)$ evalúa la calidad de la construcción parcial con base en su tiempo total de duración, y la función $h(x)$ representa el tiempo estimado de duración de las actividades no consideradas aún en la construcción parcial.

Para estimar la duración de las actividades no consideradas aún en la construcción parcial, se asume la peor planificación de las tareas

faltantes, o sea la planificación secuencial, razón por la cual $h(x)$ corresponde a la suma de las duraciones de las tareas no programadas. Tal estimación evita que una construcción con menos tareas programadas sea mejor evaluada que una construcción con más tareas programadas. No obstante, cuando se presenta el peor caso, esto es cuando las restricciones de recursos provocan una solución secuencial, puede ocurrir que una construcción parcial sea mejor evaluada que una construcción total. Este inconveniente se supera aplicando una leve ponderación a la función $h(x)$.

• **Operadores Constructivo-Evolutivos**

El operador de selección, que utiliza la función $f(x)$ para evaluar los individuos, puede ser de naturaleza tanto elitista como probabilística. En cada iteración, la selección elitista (asociada al conjunto B) escoge los mejores individuos, y la selección probabilística (asociada al conjunto A) intenta aumentar la probabilidad de supervivencia de los mejores individuos.

La denominada selección por torneo binario hace competir individuos aleatoriamente emparejados y elige a los ganadores para la siguiente iteración. Así, se garantizan poblaciones heterogéneas y se excluyen mínimos locales. La probabilidad de selección de un individuo es $P(x) = (1 + s)/2$, donde $0 \leq s \leq 1$ representa el valor normalizado de ese individuo. Por lo tanto, aquel individuo más apto tiene una mayor probabilidad de ser seleccionado.

El operador de cruzamiento combina pares de individuos, aleatoriamente elegidos, para generar otros más evolucionados, de manera que las tareas de una construcción se insertan en otra que tenga programadas las que le preceden. En la Figura 5 se aprecia la generación de dos construcciones descendientes a partir de un par de construcciones progenitoras.

El uso de una probabilidad de cruzamiento reduce la combinación de individuos de los conjuntos A consigo mismo, A con B y A con E (compuesto de tareas individuales).

El operador de mutación consiste en insertar una tarea en una construcción parcial que tenga programadas todas las que le anteceden, tal como lo hace el operador de cruzamiento que combina los conjuntos A y E. La existencia de una probabilidad de mutación, distinta a la probabilidad de cruzamiento, establece la diferencia entre ambos operadores.

• **Parámetros y criterio de término**

El algoritmo necesita tres parámetros. El primero corresponde a la probabilidad de cruzamiento; el segundo, a la probabilidad de mutación; y el tercero, al multiplicador de población. El producto entre el número de tareas y el multiplicador de población establece la cardinalidad de los conjuntos A y B, y, consecuentemente, del conjunto C que contiene las construcciones resultantes de la aplicación de los operadores definidos.

Como elemento del criterio de término, el algoritmo utiliza un contador de iteraciones. Así, cada vez que se encuentra una solución mejor que la anterior, el contador toma el valor cero; en cambio, si la calidad de la solución no mejora después de cierto número de iteraciones, el algoritmo se detiene.

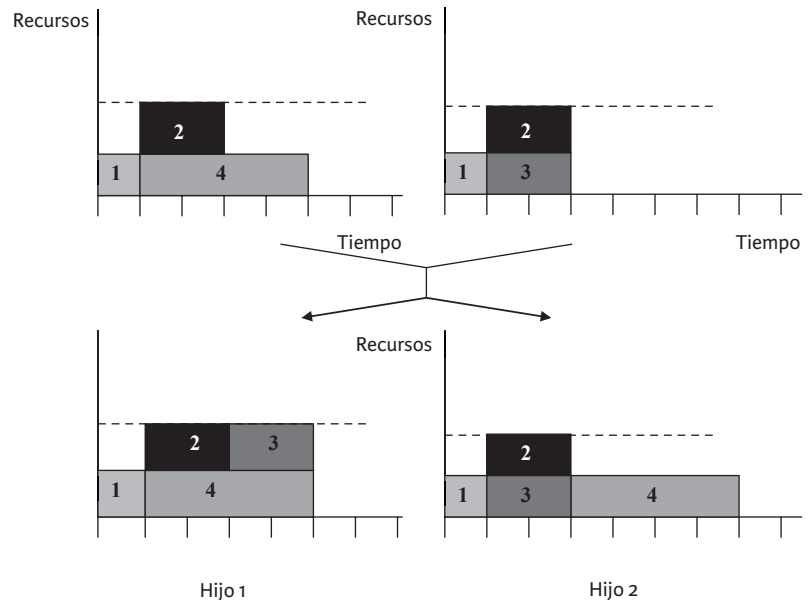


FIGURA 5. ESQUEMA DE CRUZAMIENTO

RESULTADOS

Las pruebas del algoritmo constructivo-evolutivo (ACE) se realizaron en un computador con CPU AMD Athlon X2 Dual-Core de 3.5GHz y RAM de 4Gb. Para el experimento se utilizaron 150 instancias del problema obtenidas desde Kolisch R. and A. Sprecher: 50 de 30 tareas, 50 de 60 tareas y 50 de 120 tareas. Dado que el algoritmo utiliza una componente aleatoria, la experiencia se realizó diez veces para cada instancia.

• **Fase preliminar**

En la primera fase de pruebas, para las instancias de 30 tareas, en el 29% de los casos se logró una solución óptima. En el 71% de los casos restantes el error promedio no excedió el 4.7%. Para las instancias de 60 tareas, se encontró una solución óptima en el 21% de los casos; en el 79% de los casos restantes el error promedio

no excedió el 8,9%. Para las instancias de 120 tareas, se obtuvo la solución óptima en el 14% de los casos. En el 86% de los casos restantes el error promedio no excedió el 19,9%

De lo anterior, se advierte que al incrementar la cantidad de tareas (tamaño del problema), aumenta el espacio de búsqueda factible, haciéndose cada vez más difícil encontrar un camino conducente al valor óptimo, lo que se traduce en el aumento de la diferencia entre los resultados obtenidos y los valores de referencia. No obstante, el error promedio producido evidencia que los resultados continúan siendo de buena calidad.

Otro factor que incide notablemente en los resultados es el conjunto de parámetros utilizados. Intuitivamente, es posible observar que un conjunto adecuado de parámetros es dependiente de cada tipo de instancias del problema. Sin embargo, en esta fase se utilizó el mismo conjunto de parámetros para las instancias de 30, 60 y 120 tareas, con la finalidad de facilitar la posterior labor de calibración derivada de un comportamiento preliminar del algoritmo.

• Calibración de parámetros

Dado que para cada tipo de instancia existe un conjunto singular de parámetros, en esta fase del experimento se intenta descubrir aquel conjunto más beneficiosamente representativo de todos.

Se experimentó con tres conjuntos de parámetros: el primero contempló un 98% para la probabilidad de cruzamiento, un 2% para la probabilidad de mutación y 2 como multiplicador de población (PR=98, PM=2, MP=2); el segundo conjunto considera un 85% para la probabilidad de cruzamiento, un 6% para la probabilidad de mutación y 4 como multiplicador de población (PR=85, PM=6, MP=4); y el tercer conjunto utiliza un 60% como probabilidad

de cruzamiento, un 8% como probabilidad de mutación y 6 como multiplicador de población (PR=60, PM=8, MP=6).

Con la elección de estos conjuntos de parámetros se pretende contribuir al aumento de la diversidad de la población, es decir, que en una misma iteración se generen individuos que presenten diferentes niveles de desarrollo. En virtud del carácter constructivo del algoritmo, el nivel de desarrollo de un individuo lo establece el número de tareas programadas logrado en una iteración.

En esta segunda fase de pruebas, los mejores resultados se obtuvieron, para las instancias de 30 y de 60 tareas, con el segundo conjunto de parámetros; y para las instancias de 120 tareas, con el tercer conjunto de parámetros.

Complementariamente, sin perjuicio de que la generación de una mayor diversidad de soluciones aumente la probabilidad de encontrar una mejor entre ellas, en ocasiones puede llegar a ser contraproducente, tanto por los casos en que crece la desviación estándar como por el aumento del esfuerzo computacional derivado del incremento de la población.

• Convergencia

El aspecto constructivo del algoritmo asegura la obtención de una solución factible en un número finito de iteraciones directamente dependientes del conjunto de parámetros utilizados.

En primer lugar, se consideran las curvas de convergencia que resultan de la variación de la probabilidad de cruzamiento y de la mantención de las constantes probabilidad de mutación y multiplicador de población. Se observa que la solución se obtiene con una mayor cantidad de iteraciones cuando disminuye la probabilidad de cruzamiento, es decir, cuando disminuye la

cantidad de individuos que evolucionan en una iteración y, consecuentemente, incrementa la diversidad de la población.

Seguidamente se consideran las curvas de convergencia que resultan de la variación de la probabilidad de mutación y de la mantención de las constantes de probabilidad de cruzamiento y multiplicador de población. De manera similar, se aprecia que con el crecimiento de la probabilidad de mutación aumenta el número de individuos que evolucionan en una iteración y, por lo tanto, mejora la calidad de la solución.

Por último, se consideran las curvas de convergencia resultantes del aumento del multiplicador de población y de la mantención de las constantes de cruzamiento y de probabilidad de mutación. Con un comportamiento no muy distinto a los anteriores, se advierte un mejoramiento de los resultados en la medida en que se utiliza un multiplicador de población mayor. Sin embargo, se le debe prestar atención a este parámetro, pues un elevado multiplicador de población, para un reducido número de tareas, podría causar una alta redundancia de individuos en la población.

CONCLUSIONES

La trascendencia del problema de la planificación de actividades con restricciones de orden temporal y de recursos, en el ámbito organizacional, constituye un aliciente que compromete permanentes esfuerzos por encontrar cada vez mejores modelos de solución. Comúnmente, este proceso se aborda empíricamente, con lo cual se obtienen soluciones estimativas que, no obstante ser satisfactorias, carecen de la confiabilidad propia de los métodos formalmente desarrollados.

El modelo híbrido constructivo-evolutivo propuesto aprovecha la potencialidad de los enfoques que le otorgan su denominación, lo cual significa que la estrategia de utilizar conjuntos de construcciones parciales y operadores evolutivos tiene la finalidad de reducir el tamaño del espacio de búsqueda, expandiendo sólo aquellas construcciones susceptibles de contribuir a la obtención de soluciones de buena calidad.

La prueba experimental del modelo se basó en el análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante la utilización de 150 instancias de un problema que había sido resuelto previamente. Se pudo observar que la diferencia entre los valores obtenidos y los valores de referencia se incrementa con el aumento del número de tareas, lo cual significa que la calidad de los resultados del algoritmo constructivo-evolutivo es inversamente proporcional a la cantidad de tareas consideradas. Este fenómeno se debe al crecimiento explosivo de las combinaciones posibles cuando aumenta el número de tareas de un proyecto. Sin embargo, se satisfacen las expectativas cifradas, ya que el error promedio presente en los resultados obtenidos no supera el 20% en el caso de las instancias con la mayor cantidad de tareas. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo constructivo-evolutivo

propuesto es pertinente y viable para resolver el problema de la asignación de actividades con recursos limitados.

Como potenciales trabajos futuros, y con carácter de extensiones del presente, se sugiere adaptar el algoritmo a la asignación de tareas multi-modales, o bien a la inclusión de recursos no renovables.

Finalmente, es posible advertir que, sin perjuicio de la permanente preocupación por desarrollar modelos que mejoren la calidad de las soluciones para el RCPSP, aún queda bastante por hacer al respecto.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Xu, N., McKee, S., Nozick, L. and Ufomata, R.** (2008). Augmenting priority rule heuristics with justification and rollout to solve the resource-constrained project scheduling problem. *Computers & Operations Research*, vol. 35, pags. 3284-3297.
- 2 Valls, V., Ballestín, F. and Quintanilla, S.** (2008). A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, vol.185, pags. 495-508.
- 3 Moreno, F., Díaz, L., Pena, E. and Rivera, J.** (2007). A comparative analysis between two heuristic algorithms for solving the Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP). *Dyna-Colombia*, vol. 74, pags.171-183.
- 4 Tseng, L. and Chen, S.** (2006). A hybrid meta-heuristic for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 175, pags. 707-721.
- 5 Hartmann, S. And Kolisch, R.** (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. *European Journal of Operational Research*, vol. 174, pags. 23-37.
- 6 Zhang, H., Li, H. and Tam, C.** (2006). Permutation-based particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 20, pags.141-149.
- 7 Valls, V., Ballestín, F. and Quintanilla, S.** (2005). Justification and RCPSP: A technique that pays. *European Journal of Operational Research*, vol. 165, pags. 375-386.
- 8 Ballestín, F.** (2002). Nuevos métodos de resolución del problema de secuenciación de proyectos con recursos limitados. Unpublished PhD Dissertation, Universidad de Valencia.
- 9 Hartmann, S.** (2002). A Self-Adapting Genetic Algorithm for Project Scheduling under Resource Constraints. *Naval Research Logistics*, vol.49, págs. 433-448.
- 10 Merkle, D., Middendorf, M. and Schneck, H.** (2002). Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pags. 333-346.
- 11 Erenguc, S., Ahn, T. and Conway, D.** (2001). The Resource Constrained Project Scheduling Problem with Multiple Crashable Modes: An Exact Solution Method. *Naval Research Logistics*, vol. 48(2), págs. 107-127.
- 12 Brucker, P. and Knust, S.** (2000). A Linear Programming and Constraint Propagation-Based Lower Bound for the RCPSP. *European Journal of Operational Research*, vol. 127, págs. 355-362.
- 13 Dorndorf, U., Pesch, E. and Phan-Huy, T.** (2000). A Branch and Bound Algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem. *Mathematical Methods of Operations Research*, vol. 52, págs. 413-439.
- 14 Kolisch, R. and Hartmann, S.** (1999). Heuristic Algorithms for Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis. *Project Scheduling: Recent Models, Algorithms and Applications*, pags.147-178.
- 15 Palma, R.** (1997). Solución al Problema de Corte de Piezas No Guillotina Utilizando un Método Híbrido Constructivo-Evolutivo. Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile.

- 16 Gómes, A. and Parada, V.** (1996). Métodos Meta-Heurísticos para Resolver Problemas de Corte de Piezas. Universidade Federal do Espírito Santo, Universidad de Santiago de Chile.
- 17 Osman, I. and Kelly, J.** (1996). Meta-Heuristics: Theory and Applications. Ed. Kluwer Academic, Boston.
- 18 Simpson, W. And Patterson, J.** (1996). A Multipletree Search Procedure for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. EJOR, Vol. 89, págs.525-542.
- 20 Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S. and Bianco, L.** (1995). An Exact Algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. Department of Mathematics, University of Bologna, Bologna, Italia, Department of Electrical Engineering, University Tor Vergata, Roma, Italia.
- 21 Demeulemeester, E.** (1992). Optimal Algorithms for Various Classes of Multiple Resource Constrained Project Scheduling Problems. Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica.
- 22 Christofides, N., Alvarez-Valdez, R. and Tamarit, J. M.** (1987). Project Scheduling with Resource Constraints: a Branch and Bound Approach. Europe Journal of Operations Research, vol. 29, págs. 262-273.
- 23 Patterson, J.** (1984). A Comparison of Exact Approaches for Solving the Multiple Constrained Resources, Project Scheduling Problem. Management Science, vol. 30, págs.854-867.
- 24 Pearl, J.**(1984).Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. Addison-Wesley Publishing Company.
- 25 Blazewicz, J., Lenstra, J., and Rinnooy Kan A.** (1983). Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and Complexity. Discrete Applied Mathematics, págs. 11-24.
- 26 Stinson, J., Davis, E. and Kjumawala, B.** (1978) "Multiple Resource-Constrained Scheduling Using Branch and Bound. AIIE Transactions, vol. 10, págs. 252-259.
- 27 Elmaghraby, S.** (1977). Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models. Wiley, New York.
- 28 Fisher, M.** (1973). Optimal Solution of Scheduling Problems Using Lagrange Multipliers. Part I, Operations Research, vol. 21, págs. 114-1127.
- 29 Gorenstein, S.** (1972). An Algorithm for Project Sequencing with Resource Constraints. Operations Research, vol. 20, págs. 835-850.
- 30 Kolisch, R. and A. Sprecher** (1996): PSPLIB - A project scheduling library, European Journal of Operational Research, Vol. 96, pp. 205--216.

Jorge Tobar Pinto

Jtobarp.ing.electronica@gmail.com

Universidad Tecnológica Metropolitana

Fernando Ulloa Vásquez

fulloa@utem.cl

Universidad Tecnológica Metropolitana

FUSIÓN Y FILTRADO DE DATOS INERCIALES DE UNA IMU DE 5DOF, PARA OBTENCIÓN DE LA ACTITUD DE UN VEHÍCULO U OBJETO

RESUMEN

En el presente trabajo se explican, desarrollan y exponen los resultados de la fusión de los datos adquiridos de un acelerómetro y un giroscopio para obtener la actitud de un vehículo u objeto.

Palabras clave: **acelerómetro, filtro complementario, giroscopio, unidad de medida inercial.**

ABSTRACT

In this paper explains, develops, and discuss results from the fusion of data acquired from an accelerometer and a gyroscope, for the attitude of a vehicle or object.

Keywords: **accelerometer, filter complementary, gyroscope, inertial measurement unit.**

1. INTRODUCCIÓN

Para controlar la actitud de un vehículo u objeto, es preciso disponer de sensores para medir la actitud del vehículo u objeto. Éstos pueden ser un acelerómetro y/o un giroscopio, pero al momento de trabajar con ellos en forma individual, pueden ser susceptibles al ruido o a la acumulación del error.

Para evitar estos problemas, se fusionan los datos obtenidos de tales sensores en forma simplificada.

2. FILTRADO DE DATOS INERCIALES

Para comprender el funcionamiento de la IMU y del filtro complementario, hay que explicar todo desde un principio, desde el mismo funcionamiento del acelerómetro y giroscopio hasta cómo se fusionan los datos para obtener finalmente la actitud.

2.1. Acelerómetro

Para comprender esta unidad, empezaremos por el acelerómetro. Cuando se piensa en los acelerómetros, a menudo es útil recurrir a la imagen de una caja en forma de cubo con una bola en su interior.

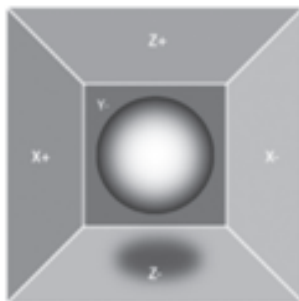


FIGURA 1. IMAGEN DE UNA CAJA EN FORMA DE UN CUBO CON UNA BOLA EN SU INTERIOR.

Si tomamos esta caja en un lugar sin campos gravitacionales o, lo que para el caso es lo mismo, sin otros campos que puedan afectar a la posición de la pelota, la pelota simplemente flotará en el centro de la caja. Desde la figura anterior se puede ver que se le asigna a cada eje un par de paredes (se quitó la pared +Y para que se pueda ver dentro de la caja). Hay que imaginar que cada pared es sensible a la presión. Si se mueve de repente la caja desde la izquierda (que se acelera con la aceleración de $1\text{ g} = 9,8\text{ m/s}^2$), la pelota golpeará la pared X-. A continuación, mediremos la fuerza de presión que la bola aplica a la pared y la salida de un valor de -1 g en el eje X.

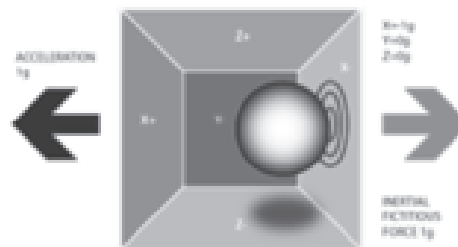
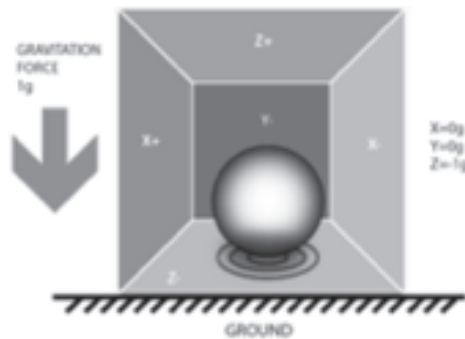


FIGURA 2. CAJA ACELERACIÓN HACIA LA IZQUIERDA

Podemos observar que el acelerómetro realmente detecta una fuerza que se dirige en la dirección opuesta a partir del vector de aceleración. Esta fuerza se llama a menudo fuerza de inercia o fuerza ficticia. Una cosa que se debe aprender de esto es que un acelerómetro mide la aceleración indirectamente a través de una fuerza que se aplica a una de sus paredes (de acuerdo con este modelo, podría ser un resorte o algo más en los acelerómetros de la vida real). Esta fuerza puede ser causada por la aceleración, pero como se verá en el siguiente ejemplo, no siempre es causada por la aceleración.

Si tomamos este modelo y lo situamos en la Tierra, caerá la bola en la pared Z- y se aplicará una fuerza de 1 g en la pared del fondo, como se muestra en la imagen siguiente:

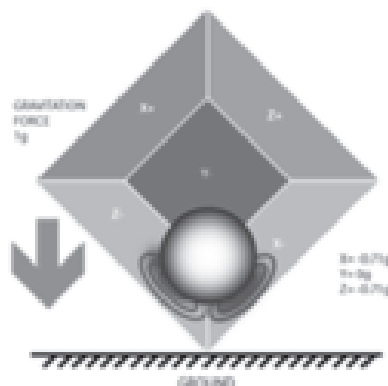
FIGURA 3. CAJA CON ACELERACIÓN GRAVITACIONAL.



En este caso, la caja no se está moviendo, pero aun así se obtiene una lectura de -1 g en el eje Z. La presión que la bola ha aplicado en la pared fue causada por una fuerza de gravitación. Lo que ocurre es que la aceleración provoca una fuerza de inercia que es capturada por el mecanismo de detección de la fuerza del acelerómetro.

Hasta ahora se ha analizado la salida del acelerómetro sólo en un eje y esto es todo lo que se obtiene con un acelerómetro de eje único. El valor real de los acelerómetros tri-axiales proviene del hecho de que pueden detectar las fuerzas de inercia en los tres ejes. Volviendo al modelo de la caja, se gira la caja en 45 grados a la derecha. La pelota va a tocar 2 paredes ahora: Z- y X-, como se muestra en la figura siguiente:

FIGURA 4. CAJA CON ACELERACIÓN GRAVITACIONAL GIRADA 45°.



Los valores de 0,71 no son arbitrarios, e. En realidad son una aproximación para $\sqrt{1/2}$, sobre lo que se volverá más adelante. En el modelo anterior se ha fijado la fuerza de la gravedad y el giro de la caja imaginaria. En los últimos 2 ejemplos que hemos analizado, se han probado 2 posiciones diferentes de la caja, mientras que el vector de fuerza se mantuvo constante. Si bien esto es útil para entender la interacción con el acelerómetro de fuerzas externas, es más práctico para realizar los cálculos, si se fijan el sistema de coordenadas de los ejes del acelerómetro e imaginemos que el vector de fuerza gira alrededor de nosotros.

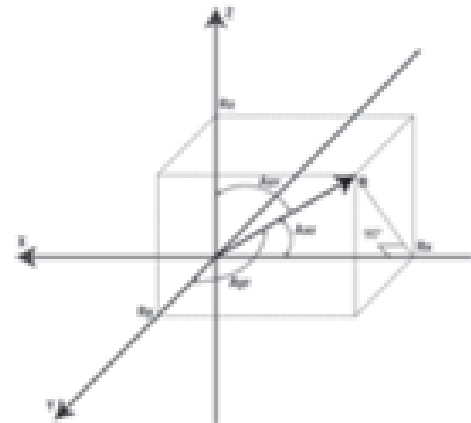


FIGURA 5. SISTEMA DE COORDENADAS DE LOS EJES DEL ACELERÓMETRO.

Observando la figura anterior (en la que se conservan los colores de los ejes), imaginemos que cada eje en el nuevo modelo es perpendicular a las respectivas caras de la caja en el modelo anterior. El vector R es el vector de fuerza que el acelerómetro está midiendo (que podría ser la fuerza de la gravedad o la fuerza de Inercia). Rx, Ry, Rz son la proyección del vector R en los ejes X, Y, Z.

Ecuación 1 (básicamente, el equivalente del teorema de Pitágoras en 3D):

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2 + R_z^2$$

Para comprobar que los valores anteriormente utilizados no eran cifras al azar ($\sqrt{1/2} \sim 0.71$). Si se conecta en la fórmula anterior, después de recordar que nuestra fuerza de gravitación fue de 1 g se puede comprobar que:

$$1^2 = (\sqrt{1/2})^2 + 0^2 + (-\sqrt{1/2})^2$$

Simplemente mediante la sustitución de $R = 1$,

$$R_x = -(\sqrt{1/2}), R_y = 0, R_z = -(\sqrt{1/2})$$

para la ecuación 1..

Después de un largo preámbulo, la teoría se va acercando a los acelerómetros de la vida real. Los valores de R_x , R_y , R_z en realidad están linealmente relacionados con los valores de salida de los acelerómetros de la vida real, que se pueden utilizar para realizar diversos cálculos.

La mayoría de los acelerómetros se clasifican en dos categorías: digital y analógica. Los Acelerómetros digitales se entregan la información a través de un protocolo de serie, como I2C, SPI y USART; mientras que en los acelerómetros analógicos es se da una salida de un nivel de tensión dentro de un rango predefinido, el que posteriormente se procesa a través de un ADC (conversor análogo digital).

Al considerar un ejemplo sencillo, supongamos que nuestro módulo de 10 bits ADC nos dioarrojó los siguientes valores para los tres canales de acelerómetro (ejes):

$$\text{AdcRx} = 586$$

$$\text{AdcRy} = 630$$

$$\text{AdcRz} = 561$$

Cada módulo ADC tendrá un voltaje de referencia., vamos a suponer, para en nuestro ejemplo, que es de 3.3V. Para para convertir un

valor de 10 bits ADC a un voltaje que utilice la siguiente fórmula:

$$\text{VoltsRx} = \frac{\text{AdcRx} \cdot V_{\text{ref}}}{1023}$$

Una nota rápida aquí: ADC de 8 bits que, por el divisor de última, sería $2^8 - 1$, y para 12 bits ADC divisor de última sería $2^{12} - 1$. Aplicando esta fórmula a los 3 canales que recibimos, obtenemos:

$$\text{VoltsRx} = 586 * 3,3 / 1023 = \sim 1.89V$$

$$\text{VoltsRy} = 630 * 3,3 / 1023 = \sim 2.03V$$

$$\text{VoltsRz} = 561 * 3,3 / 1023 = \sim 1.81V$$

(Redondeamos todos los resultados de 2 puntos decimales).

Cada acelerómetro tiene un nivel de tensión de gravedad cero, que se puede encontrar en las especificaciones. Este es el voltaje que corresponde a 0 g. Para obtener un valor de tensión firmado, tenemos que calcular el cambio de este nivel. Digamos que nuestro nivel de tensión es $V_{\text{zeroG}} = 0 \text{ g} = 1.65V$. Calculamos los cambios de tensión de gravedad cero de tensión de la siguiente manera:

$$\text{DeltaVoltsRx} = 1.89V - 1.65V = 0.24V$$

$$\text{DeltaVoltsRy} = 2.03V - 1.65V = 0.38V$$

$$\text{DeltaVoltsRz} = 1.81V - 1.65V = 0.16V$$

Ahora tenemos nuestras lecturas del acelerómetro en voltios, más todavía no es en g ($9,8 \text{ m/s}^2$). Para realizar la conversión final, se aplica la sensibilidad del acelerómetro, que por lo general se expresa en mV / g . Digamos que nuestra sensibilidad es de $478.5 \text{ mV/g} = 0.4785 \text{ V/g}$. Los valores de sensibilidad se pueden encontrar en las especificaciones del acelerómetro. Para obtener los valores de fuerza

de final expresados en gramos, se utiliza la siguiente fórmula:

$$R_x = \text{DeltaVoltsRx} / \text{Sensibilidad}$$

$$R_x = 0.24V / 0.4785V / g \approx 0,50 g$$

$$R_y = 0.38V / 0.4785V / g \approx 0,79 g$$

$$R_z = 0.16V / 0.4785V / g \approx 0,33 g$$

Se podría, por supuesto, combinar todos los pasos y dar con una sola fórmula, pero se prefirió explicitar todos los pasos para que quedara claro cómo se va a partir de lecturas de ADC para un componente de vector de fuerza expresada en g.

$$R_x = \frac{\frac{\text{AdcRx} \cdot V_{\text{ref}}}{1023} - V_{\text{zeroG}}}{\text{Sensibilidad}}$$

$$R_y = \frac{\frac{\text{AdcRy} \cdot V_{\text{ref}}}{1023} - V_{\text{zeroG}}}{\text{Sensibilidad}}$$

$$R_z = \frac{\frac{\text{AdcRz} \cdot V_{\text{ref}}}{1023} - V_{\text{zeroG}}}{\text{Sensibilidad}}$$

Ahora se tienen los 3 componentes que definen nuestro vector de fuerza de inercia. Si el dispositivo no está sujeto a otras fuerzas distintas de la gravitación, se puede asumir que esta es la dirección de nuestro vector de fuerza de gravitación. Si se desea calcular la inclinación del dispositivo con respecto al suelo, se puede calcular el ángulo entre el vector y el eje Z. Si se está también interesado en la dirección del eje de inclinación, se puede dividir este resultado en 2 componentes: la inclinación en el eje X e Y, pudiéndose calcular el ángulo entre el vector gravitacional y los ejes X / Y. El cálculo de estos ángulos es más simple de lo que parece, ahora que se han calculado los

valores de Rx, Ry y Rz. Así, volviendo al modelo de acelerómetro pasado:

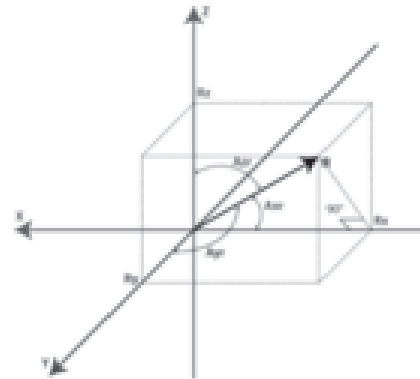


FIGURA 6. SISTEMA DE COORDENADAS DE LOS EJES DEL ACELERÓMETRO.

Los ángulos que nos interesan son los ángulos entre X, Y, Z y el vector de fuerza R. Se definirán estos ángulos como AXR, AYR, AZR. Se puede notar desde el triángulo rectángulo formado por R y Rx que:

$$\text{COS (AXR)} = R_x / R, \text{ y de manera similar:}$$

$$\text{COS (AYR)} = R_y / R$$

$$\text{COS (AZR)} = R_z / R$$

Se puede deducir de la Ecuación 1 que:

$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$. Se puede encontrar ahora nuestros ángulos mediante el uso de arcos ():

$$A_{xr} = \arccos (R_x / R)$$

$$A_{yr} = \arccos (R_y / R)$$

$$A_{zr} = \arccos (R_z / R)$$

Se ha recorrido un largo camino para explicar el modelo de acelerómetro, sólo para llegar a estas fórmulas. Introduciremos también el modelo de giroscopio, y se verá cómo los datos del acelerómetro y giroscopio se pueden combinar para obtener estimaciones más precisas de inclinación.

Pero antes se expresan las fórmulas, de forma más útil:

$$\cos x = \cos (A_{xr}) = R_x / R$$

$$\cos Y = \cos (A_{yr}) = R_y / R$$

$$\cos Z = \cos (A_{zr}) = R_z / R$$

A esta triplete se le llama con frecuencia “coseno director”, y básicamente representa el vector unitario (vector de longitud 1) que tiene la misma dirección que nuestro vector R. De esta manera, se comprueba fácilmente que:

$$\sqrt{\cos^2(x) + \cos^2(y) + \cos^2(z)} = 1$$

Esta es una propiedad muy práctica, ya que nos absuelve de la vigilancia del módulo (longitud) del vector R. Muchas veces si sólo se está interesado en la dirección de nuestro vector de inercia, que tiene sentido para normalizar su módulo con el fin de simplificar los cálculos de otros.

2.2 Giroscopio

No introduciremos cualquier modelo de caja equivalente para el giroscopio como se hizo con el acelerómetro. En cambio, iremos directamente al modelo segundo de acelerómetro y se va a mostrar lo que hace la medida giroscopio de acuerdo con este modelo.

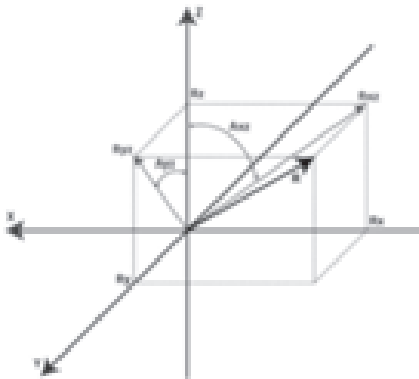


FIGURA 7. SISTEMA DE COORDENADAS DE LOS EJES DEL ACCELERÓMETRO Y GIROSCOPIO.

Cada canal del giroscopio mide la rotación alrededor de uno de los ejes. Por ejemplo, un giroscopio de 2 ejes medirá la rotación alrededor de (o algunos pueden decir "sobre") los ejes X e Y. En primer lugar se va a definir:

Rxz - es la proyección de la fuerza R vector de inercia en el plano XZ

Ryz - es la proyección de la fuerza R vector de inercia en el plano YZ

En el triángulo rectángulo formado por Rxz y Ryz, usando el teorema de Pitágoras tenemos:

$$R_{xz}^2 = R_x^2 + R_z^2, \text{ y de manera similar:}$$

$$R_{yz}^2 = R_y^2 + R_z^2$$

También hay que tener en cuenta que:

$$R^2 = R_{xz}^2 + R_y^2$$

$$R^2 = R_{yz}^2 + R_x^2$$

Esto se puede derivar de la ecuación 1 y ecuaciones anteriores, o puede ser derivado del ángulo recto contenido en el triángulo R Y Ryz. Si bien no se utilizarán estas fórmulas en este modelo, es útil tener en cuenta la relación entre todos los valores de nuestro modelo.

En su lugar se va a definir el ángulo entre el eje Z y Rxz, y vectores Ryz de la siguiente manera:

Axz - es el ángulo entre la Rxz (proyección de R en el plano XZ) y el eje Z

Ayz - es el ángulo entre la Ryz (proyección de R en el plano YZ) y del eje Z

Ahora nos estamos acercando a las medidas del giroscopio. Un giroscopio mide la tasa de cambio de los ángulos definidos anteriormente. En otras palabras, se dará salida a un valor que está relacionado linealmente con la velocidad de cambio de estos ángulos. Para explicar esto

se va a suponer que se ha medido el ángulo de rotación alrededor del eje Y (que sería el ángulo AXZ) en el tiempo t_0 , que definimos como AXZ_0 . Junto a este ángulo se midió en un tiempo t_1 que originó AXZ_1 . La tasa de cambio se calcula como sigue:

$$\text{RateAxz} = \frac{AXZ_1 - AXZ_0}{(t_1 - t_0)}$$

Si se expresa Axz en grados, y el tiempo en segundos, este valor se expresa en grados / s, que es finalmente lo que mide un giroscopio. En la práctica, un giroscopio (a menos que sea un giroscopio digital especial) rara vez arrojará un valor expresado en grados. Igual que para el acelerómetro, se obtiene un valor analógico que se tendrá que procesar para ser expresado en grados / s utilizando una fórmula similar a la ecuación 2 que se ha definido para el acelerómetro.

$$\text{RateAxz} = \frac{\frac{\text{AdcGyroXZ} \cdot V_{\text{ref}}}{1023} - V_{\text{zeroRate}}}{\text{Sensibilidad}}$$

$$\text{RateAyz} = \frac{\frac{\text{AdcGyroYZ} \cdot V_{\text{ref}}}{1023} - V_{\text{zeroRate}}}{\text{Sensibilidad}}$$

AdcGyroXZ, AdcGyroYZ - se obtienen de la lectura realizada por el microcontrolador que representan los canales que miden la rotación de la proyección de R vector en XZ, respectivamente, en planos YZ, que es el equivalente a decir que la rotación se realiza alrededor de los ejes Y e X respectivamente.

V_{ref} es la tensión de referencia ADC.

V_{zeroRate} es la tensión de tasa cero, en otras palabras, la tensión que genera el giroscopio cuando no está sujeto a la rotación. (información proporcionada en la hoja de datos).

La sensibilidad del giroscopio se expresa en mV / (deg/s), que con frecuencia se escribe mV/°/s, lo que básicamente le indica cuántos mV será el aumento de la producción del giroscopio, si se aumenta la velocidad de rotación por un grados/s (información proporcionada en la hoja de datos).

Tomando un ejemplo, supongamos que nuestro módulo ADC devuelve los siguientes valores:

$$\text{AdcGyroXZ} = 571$$

$$\text{AdcGyroXZ} = 323$$

Utilizando la fórmula anterior, y utilizando los parámetros de especificaciones técnicas de Acc_Gyro, se obtiene:

$$\text{RateAxz} = \frac{\frac{571 \cdot 3,3}{1023} - 1,23}{0,002 \left(\frac{\text{deg}}{\text{seg}} \right)} = \sim 306 \left[\frac{\text{grados}}{\text{seg}} \right]$$

$$\text{RateAxz} = \frac{\frac{323 \cdot 3,3}{1023} - 1,23}{0,002 \left(\frac{\text{deg}}{\text{seg}} \right)} = \sim -94 \left[\frac{\text{grados}}{\text{seg}} \right]$$

En otras palabras, el dispositivo gira alrededor del eje Y (o puede decir que gira en el plano XZ) con una velocidad de 306 grados / s, y alrededor del eje X (o puede decir que gira en el plano YZ) con una velocidad de - 94 grados / s. Se observa que el signo negativo significa que el dispositivo gira en la dirección opuesta a la dirección positiva convencional. Por convención, un sentido de rotación es positivo. Una hoja de especificaciones de un giroscopio, de buena voluntad, muestra en qué dirección es positivo, de lo contrario ese valor se tendría que obtener mediante la experimentación con el dispositivo y tomando nota de la dirección de los resultados de la rotación de la tensión creciente en el pin de salida. Para estos fines es recomendable trabajar con un osciloscopio, ya que tan pronto como se detenga la rotación de

la tensión caerá de nuevo al nivel de tasa cero.

2.3 La combinación de datos del acelerómetro y giroscopio.

El primer paso en el uso de un dispositivo IMU es la combinación de un acelerómetro y un giroscopio, la alineación de sus sistemas de coordenadas. La forma más sencilla de hacerlo es elegir el sistema de coordenadas del acelerómetro como el sistema de coordenadas de referencia. La mayoría de las hojas de datos del acelerómetro mostrará la dirección de X, Y, Z con respecto a la imagen del chip físico o dispositivo. Por ejemplo, aquí están las direcciones de X, Y, Z, como se muestra en las especificaciones para la Acc_Gyro bordo:

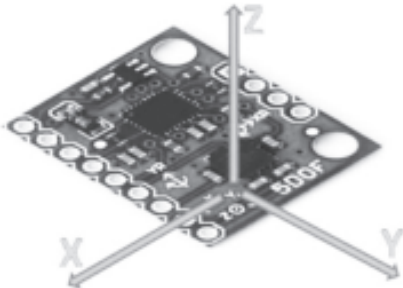


FIGURA 8. IMU CON SISTEMAS DE COORDENADAS

Los próximos pasos son los siguientes:

- Identificar las salidas del giroscopio que corresponden a RateAxz, valores RateAyz discutido anteriormente.

- Determinar si estas salidas deben ser invertidas debido a la posición física de giroscopio en relación con el acelerómetro. No asumir que, si un giroscopio tiene una salida marcada X o Y, corresponderá a cualquiera de los ejes en el sistema de coordenadas del acelerómetro, incluso si esta salida es parte de una unidad IMU. La mejor manera es probarlo.

- Se empieza colocando el dispositivo en posición horizontal, tanto X como las salidas Y del acelerómetro que la salida de la tensión

de gravedad cero (por ejemplo, para Acc_Gyro este es habitualmente 1.65V).

- En la próxima salida, girar el dispositivo en el eje Y. Otra manera de decirlo es que se gira el dispositivo en el plano XZ, de modo que las salidas del acelerómetro X y Z permanecen constantes.

- Mientras se gira el dispositivo a una velocidad constante, se notan cambios en la salida del giroscopio. Las otras salidas del giroscopio deben permanecer constantes.

- La salida de giroscopio que cambió durante la rotación alrededor del eje Y (la rotación en el plano XZ) proporcionará el valor de entrada para AdcGyroXZ, de la cual se calcula RateAxz.

- El paso final es garantizar el sentido de rotación que corresponde a nuestro modelo, en algunos casos puede que se tenga que invertir el valor RateAxz debido a la posición física del giroscopio en relación con el acelerómetro.

- Se debe realizar nuevamente la prueba anterior, girando el dispositivo en torno al eje Y. Esta debe monitorizar la salida X del acelerómetro (AdcRx en nuestro modelo). Si AdcRx crece (los primeros 90 grados de rotación desde la posición horizontal), luego AdcGyroXZ debe disminuir debido a que estamos controlando el vector gravitacional. Cuando el dispositivo gira en una dirección, el vector debe girar en dirección opuesta (en relación con el sistema de coordenadas del dispositivo que estamos usando). Por lo tanto, lo que se necesita para invertir RateAxz se puede obtener mediante la introducción de un factor de signo en la ecuación 3, de la siguiente manera:

$$\text{RateAxz} = \text{InvertAxz} * \left(\frac{\left(\frac{\text{AdcGyroXZ} * \text{Vref}}{1023} - \text{VzeroRate} \right)}{\text{Sensibilidad}} \right)$$

, donde InvertAxz es 1 o -1.

Misma prueba se puede hacer para RateAyz., girando Girando el dispositivo alrededor del eje X, y se puede identificarse que como la transformación corresponde correspondiente a RateAyz del giroscopio y tiene que ser invertida. Una vez que se tenga el valor para InvertAyz, se debe utilizar la siguiente fórmula para calcular RateAyz:

$$\text{RateAyz} = \text{InvertAyz} * \left(\frac{\frac{\text{AdcGyroYZ} * \text{Vref}}{1023} - \text{VzeroRate}}{\text{Sensibilidad}} \right)$$

Si se le hacen estas pruebas en Acc_Gyro se obtendría el siguiente resultado:

- El pin de salida de RateAxz es GX4 y InvertAxz = 1

- El pin de salida de RateAyz es GY4 y InvertAyz = 1

A partir de ahora se va a considerar que está configurada la IMU, de tal manera que se puede calcular los valores correctos para Axr, Ayr, Azr (tal como se define 2.1. Acelerómetro) y RateAxz, RateAyz (como se define en la 2.2. Giroscopio).

A continuación se analizarán las relaciones entre estos valores que resultan útiles en la obtención de una estimación más precisa de la inclinación del dispositivo con respecto al plano del suelo.

En los próximos pasos se presentará un algoritmo que toma algunas ideas utilizadas en el filtro de Kalman, sin embargo, es mucho más simple y más fácil de implementar en dispositivos encapsulados. Antes de eso se va a ver primero lo que se quiere calcular del algoritmo, como la dirección del vector fuerza de la gravitación $R = [Rx, Ry, Rz]$ a partir de la cual se puede obtener otros valores como Axr, Ayr, Azr o $\cos(x)$, $\cos(y)$, $\cos(z)$, los cuales nos darían una idea acerca de la inclinación del dispositivo en relación con el plano del suelo. Se discute la relación

entre estos valores en el punto 2.1. Si bien ya se obtienen estos valores Rx, Ry, Rz de la ecuación 2 en el punto 2.2, hay que recordar que estos valores derivan de los datos del acelerómetro únicamente, por lo que si sería para usarlos directamente en su aplicación, puede ser que se consiga más ruido que la aplicación puede tolerar. Para evitar una mayor confusión se va a volver a definir las mediciones del acelerómetro de la siguiente manera:

Racc - es el vector de fuerza de inercia, medida por el acelerómetro, que consta de los componentes siguientes (proyecciones en X, Y, Z):

$$RxAcc = \frac{\frac{\text{AdcRx} * \text{Vref}}{1023} - \text{VzeroG}}{\text{Sensibilidad}}$$

$$RyAcc = \frac{\frac{\text{AdcRy} * \text{Vref}}{1023} - \text{VzeroG}}{\text{Sensibilidad}}$$

$$RzAcc = \frac{\frac{\text{AdcRz} * \text{Vref}}{1023} - \text{VzeroG}}{\text{Sensibilidad}}$$

Hasta el momento, se tiene un conjunto de valores de medición que se puede obtener sólo a partir de los valores análogos del acelerómetro. Se llamará a este conjunto de datos un "vector" y se usará la siguiente notación:

$$Racc = [RxAcc, RyAcc, RzAcc]$$

Debido a que estos componentes de Racc se pueden obtener a partir de los datos del acelerómetro, se puede considerar una entrada al algoritmo.

Se debe tener en cuenta que Racc mide la fuerza gravitacional, que será correcta si se asume que la longitud de este vector es igual o cercana a 1 g.

$$|Racc| = \sqrt{RxAcc^2 + RyAcc^2 + RzAcc^2}$$

Sin embargo, para asegurarse de que tiene sentido se deberá actualizar este vector de la siguiente manera:

$$\text{Racc (normalizado)} = [\text{RxAcc} / |\text{Racc}|, \text{RyAcc} / |\text{Racc}|, \text{RzAcc} / |\text{Racc}|].$$

Esto asegurará que la longitud del vector de Racc normalizado sea siempre 1.

A continuación vamos a introducir un nuevo vector que llamaremos:

$$\text{Rest} = [\text{RxEst}, \text{RyEst}, \text{RzEst}]$$

Este será el resultado del algoritmo, que corrige los valores sobre la base de los datos de los giroscopios y con base en los últimos datos estimados.

Así es como funciona el algoritmo:

El acelerómetro nos dice: "Usted está ahora en posición de Racc"; respondemos: "Gracias, pero déjame chequear". A continuación, se corrige esta información con datos de los giroscopios, así como con los datos de los medidos anteriores para Rest y la salida de un nuevo vector Rest estimado.

Rest se considera "la mejor apuesta" en cuanto a la posición actual del dispositivo.

Se va a empezar la secuencia por confiar en el acelerómetro, y la asignación queda así:

$$\text{Rest}(0) = \text{Racc}(0)$$

Hay que recordar que Rest y el Racc son vectores, por lo que la ecuación anterior es sólo una forma simplificada de generar 3 series de ecuaciones y evitar así la repetición:

$$\text{RxEst}(0) = \text{RxAcc}(0)$$

$$\text{RyEst}(0) = \text{RyAcc}(0)$$

$$\text{RzEst}(0) = \text{RzAcc}(0)$$

A continuación se harán mediciones periódicas en intervalos de tiempo iguales a T segundos, y se obtendrán nuevas mediciones que se definirán como Racc(1), Racc(2), Racc(3) y así sucesivamente. También se expresarán nuevas estimaciones en cada intervalo de tiempo Rest(1), Rest(2), Rest(3) y así sucesivamente.

Supongamos que estamos en n pasos. Se tienen dos grupos conocidos de valores que nos gustaría utilizar:

Rest(n-1) - nuestra estimación anterior, con el Rest(0) = Racc(0)

Racc(n) - actual medición del acelerómetro

Antes de que se pueda calcular Rest(n), se va a introducir un nuevo valor de medición, que se puede obtener del giroscopio y una estimación anterior.

Lo nombraremos como Rgyro, que también es un vector formado por 3 componentes:

$$\text{Rgyro} = [\text{RxGyro}, \text{RyGyro}, \text{RzGyro}]$$

Se va a calcular este vector de un componente a la vez. Se empieza con RxGyro..

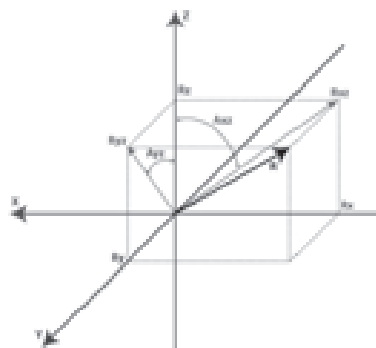


FIGURA 9. SISTEMA DE COORDENADAS DE LOS EJES DEL ACCELERÓMETRO Y GIROSCOPIO.

Se va a empezar por observar la siguiente relación en el modelo del giroscopio, desde el triángulo rectángulo formado por Rz y Rx se puede deducir que:

$$\text{tang}(Axz) = Rx / Rz \Rightarrow Axz = \text{atan2}(Rx, Rz)$$

Atan2 es una función poco usada, similar a la atan, solo que devuelve los valores en el rango de $(-\pi, \pi)$ en lugar de $(-\pi/2, \pi/2)$, como lo realiza atan. Es decir, se lleva 2 argumentos en lugar de uno y nos permite convertir los dos valores de Rx, Rz a ángulos en toda la gama de los 360 grados $(-\pi$ a $\pi)$.

Así que sabiendo RxEst (n-1), y RzEst (n-1), se puede encontrar:

$$Axz(n-1) = \text{atan2}(RxEst(n-1), RzEst(n-1)).$$

Hay que recordar que el giroscopio mide la tasa de cambio del ángulo AXZ. Así se puede estimar la nueva AXZ y el ángulo (n) como sigue:

$$Axz(n) = Axz(n-1) + \text{RateAxz}(n) * T$$

Hay que recordar que RateAxz se puede obtener del giroscopio a través de lecturas analógicas. Una forma más precisa es utilizar una velocidad de rotación media calculada como sigue:

$$\text{RateAxzAvg} = \frac{\text{RateAxz}(n) + \text{RateAxz}(n-1)}{2}$$

$$Axz(n) = Axz(n-1) + \text{RateAxzAvg} * T$$

De la misma manera que podemos encontrar:

$$Ayz(n) = Ayz(n-1) + \text{RateAyz}(n) * T$$

Ahora se tiene Axz (n) y Ayz (n). En este momento se puede escribir la longitud del vector Rgyro como sigue:

$$|Rgyro| = \sqrt{RxGyro^2 + RyGyro^2 + RzGyro^2}$$

También se ha normalizado el vector de Racc, de manera que se puede suponer que la longitud es de 1 y no ha cambiado después de la rotación, por lo que es relativamente seguro escribir:

$$|Rgyro| = 1$$

Se va a adoptar una notación temporal más corta para los cálculos siguientes:

$$x = RxGyro, y = RyGyro, z = RzGyro$$

Utilizando las relaciones anteriores, se puede escribir:

$$x = \frac{x}{1} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

Se va a dividir el numerador y el denominador de la fracción por $\sqrt{x^2 + z^2}$

$$x = \frac{\frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}}}{\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\sqrt{x^2 + z^2}}}$$

Teniendo en cuenta que $\frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}} = \sin(Axz)$, por lo que:

$$x = \frac{\sin(Axz)}{\sqrt{1 + \frac{y^2}{x^2 + z^2}}}$$

Ahora se multiplica el numerador y el denominador de la fracción en el interior de la raíz por z^2 :

$$x = \frac{\sin(Axz)}{\sqrt{1 + \frac{y^2 \cdot z^2}{(x^2 + z^2) \cdot z^2}}}$$

Teniendo en cuenta que $\frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} = \cos(Axz)$ y $\frac{y}{z} = \tan(Ayz)$, por lo que finalmente:

$$x = \frac{\sin(Axz)}{\sqrt{1 + \cos(Axz)^2 \cdot \tan(Ayz)^2}}$$

Volviendo a la notación, se obtiene:

$$RxGyro = \frac{\sin(Axz(n))}{\sqrt{1 + \cos(Axz(n))^2 \cdot \tan(Ayz(n))^2}}$$

De la misma manera, nos encontramos con que:

$$RyGyro = \frac{\sin(Ayz(n))}{\sqrt{1 + \cos(Ayz(n))^2 \cdot \tan(Axz(n))^2}}$$

Nota al margen: es posible simplificar aún más esta fórmula. Al dividir las dos partes de la fracción por el $\sin(Axz(n))$, se obtiene:

$$RxGyro = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sin(Axz(n))^2} + \frac{\cos(Axz(n))^2}{\sin(Axz(n))^2} \cdot \tan(Ayz(n))^2}}$$

$$RxGyro = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sin(Axz(n))^2} + \frac{\sin(Axz(n))^2 \cdot \cot(Ayz(n))^2}{\cos(Axz(n))^2}}}$$

Ahora se suma y resta:

$$\frac{\cos(Axz(n))^2}{\sin(Axz(n))^2} = \cot(Axz(n))^2$$

$$RxGyro = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sin(Axz(n))^2} - \frac{\cos(Axz(n))^2}{\sin(Axz(n))^2} + \frac{\sin(Ayz(n))^2 \cdot \cot(Axz(n))^2}{\cos(Ayz(n))^2} + \cot(Axz(n))^2}}$$

Y mediante la agrupación de los términos 1 y 2, y luego 3 y 4, se obtiene:

$$RxGyro = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot(Axz(n))^2 \cdot \sec(Ayz(n))^2}}$$

, donde $\cot(x) = 1 / \tan(x)$ y $\sec(x) = 1 / \cos(x)$

Esta fórmula utiliza sólo dos funciones trigonométricas, lo que puede ser computacionalmente menos engorroso.

Ahora, por fin se puede encontrar:

$$RzGyro = \text{sign}(RzGyro) \cdot \sqrt{1 - RxGyro^2 - RyGyro^2}$$

Cuando $\text{sign}(RzGyro) = 1$, cuando $RzGyro \geq 0$, y $\text{sign}(RzGyro) = -1$, cuando $RzGyro < 0$.

Una forma sencilla de calcular es tomar:

$$\text{sign}(RzGyro) = \text{sign}(RzEst(n-1))$$

En la práctica, se debe tener cuidado cuando $RzEst(n-1)$ es cercana a 0. Se puede saltar la fase de giro por completo en este caso, y asignar: $Rgyro = Rest(n-1)$. Rz se utiliza como referencia para el cálculo de ángulos $AxzyAyz$; cuando está cerca de 0, los valores pueden desbordarse y provocar malos resultados.

Recapitulando lo que se tiene hasta ahora, se está en el paso n del algoritmo, y se ha calculado los siguientes valores:

Racc - lecturas actuales del acelerómetro
Rgyro - obtenido a partir de $Rest(n-1)$ y las lecturas del giroscopio.

Se va a utilizar una media ponderada, de manera que:

$$Rest(n) = \frac{(Racc \cdot w_1 + Rgyro \cdot w_2)}{(w_1 + w_2)}$$

Se puede simplificar esta fórmula, dividiendo el numerador y el denominador de la fracción por w_1 .

$$Rest(n) = \frac{\left(Racc \cdot \frac{w_1}{w_1} + Rgyro \cdot \frac{w_2}{w_1} \right)}{\left(\frac{w_1}{w_1} + \frac{w_2}{w_1} \right)}$$

y después de sustituir $w_2/w_1 = wGyro$, se obtiene:

$$Rest(n) = \frac{(Racc + Rgyro \cdot wGyro)}{(1 + wGyro)}$$

(Ecuación 4)

Se está a un paso de conseguir los valores estimados actualizados:

$$RxEst(n) = \frac{RxAcc + RxGyro \cdot wGyro}{1 + wGyro}$$

$$RyEst(n) = \frac{RyAcc + RyGyro \cdot wGyro}{1 + wGyro}$$

$$RzEst(n) = \frac{RzAcc + RzGyro \cdot wGyro}{1 + wGyro}$$

Ahora se va a normalizar este vector de nuevo:

$$R = \sqrt{RxEst^2 + RyEst^2 + RzEst^2}$$

$$RxEst(n) = RxEst(n) / R$$

$$RyEst(n) = RyEst(n) / R$$

$$RzEst(n) = RzEst(n) / R$$

Y luego de esto, se vuelve a empezar.

3. RESULTADOS

Implementado en código en el Microcontrolador ATmega328P, se tienen los siguientes resultados:

Puesto a prueba en primera instancia a movimientos suaves, girando en torno al eje X, se obtiene RxAcc que pertenece a la aceleración variable del acelerómetro sin procesar (en Azul) y RxEst, que corresponde a los datos del acelerómetro y giroscopio filtrados (en Rojo). Posteriormente, se aplica una prueba similar, pero sumada con vibraciones. Queda de manifiesto que el comportamiento del filtro nos ayuda amortiguar los cambios bruscos y realizar una buena estimación de la inclinación, sin acumular ruido.

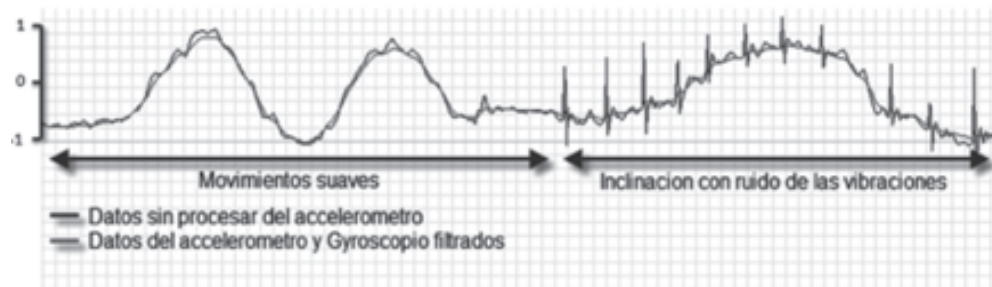


FIGURA 10. GRÁFICA DE DATOS INERCIALES, SIN PROCESAR Y CON FILTRADO.

4. CONCLUSIONES

Es inevitable realizarse la siguiente pregunta: si el modelo acelerómetro ya nos dio ángulos de inclinación de A_x , A_y , A_z , ¿por qué querríamos molestarnos con los datos de los giroscopios? La respuesta es simple: los datos del acelerómetro no siempre se pueden confiar al 100%. Hay varias razones. Hay que recordar que el acelerómetro mide la fuerza de inercia, y dicha fuerza puede ser causada por gravitación (e idealmente sólo por gravitación), pero también podría ser causada por la aceleración (movimiento) del dispositivo. Como resultado, incluso si el acelerómetro está en un estado relativamente estable, todavía es muy sensible a las vibraciones y ruidos mecánicos en general. Esta es la razón principal por la que la mayoría de los sistemas IMU utiliza un giroscopio para suavizar los errores del acelerómetro. Si bien el giroscopio no está libre de ruidos, debido a que al medir la rotación es menos sensible a los movimientos mecánicos lineales, el tipo de ruido que sufre el acelerómetro evidencia que los giroscopios tienen otros tipos de problemas, como por ejemplo la derivada (no regresar al valor de tasa cero cuando la rotación se detiene). Sin embargo, del promedio de los datos que provienen del acelerómetro y del giroscopio se puede obtener una estimación relativamente mejor de la inclinación actual del dispositivo, lo que se obtendría al utilizar los datos del acelerómetro solo.

La principal diferencia de este algoritmo con filtro Kalman es que este peso es relativamente fijo, mientras que en el filtro de Kalman los pesos están permanentemente actualizada basada en el ruido medido de las lecturas del acelerómetro. El Filtro de Kalman se centra en darle "lo mejor" de los resultados teóricos, mientras que este algoritmo puede dar un resultado "suficientemente bueno" para la aplicación práctica. Se puede implementar un algoritmo

que se ajusta a w_{Gyro} dependiendo de algunos factores de ruido objeto de la medición, pero los valores fijos funcionan bien para la mayoría de las aplicaciones.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. **M. Grewal, L. Weill, and A. Andrews**, Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, Wiley, 2007.
2. **P. Groves**, Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems. Artech House, 2008.
3. **K. Valavanis, P. Oh, and L. Piegl**, Unmanned Aircraft Systems: International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, UAV'08. Springer, 2008.
4. **P. Aggarwal, Z. Syed, A. Noureldin, and N. El-Sheimy**, MEMS-Based Integrated Navigation, ser. GNSS technology and applications series. Artech House, 2010.
5. **H. D. Whyte and T. C. Henderson**, Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008, ch. Multisensor Data Sensor, pp. 1–26.
6. **H. Qi and J. Moore**, "Direct kalman filtering approach for gps/ins integration," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 38, no. 2, pp. 687–693, apr 2002.
7. <http://www.mikroquad.com/pub/Research/ComplementaryFilter/filter.pdf>
8. <http://stackoverflow.com/questions/1586658/combine-gyroscope-and-accelerometer-data>
9. <http://www.dimensionengineering.com/accelerometers.htm>

Marco Baeza Soto

Universidad Tecnológica Metropolitana
Marco_baeza_soto@hotmail.com

Dr. Ing. Fernando Ulloa Vásquez

Universidad Tecnológica Metropolitana
fulloa@utem.cl

ESTUDIO DE TRANSFERENCIA BINARIA (Throughput binario) en función de modulaciones digitales de alta eficiencia espectral para sistemas basados en aeroplataformas móviles-cautivas de mediana altitud, tipo MAPs.

RESUMEN

Con base en la actual problemática que mantienen las diferentes entidades de telecomunicaciones, que brindan servicios de telefonía celular en relación al número de usuarios máximos por celda y la tasa binaria utilizada por cada una de ellos, se realizaron estudios de throughput binario para canales codificados y no-codificados en relación a la ganancia de código y números de usuarios erlang. Esto en función de un sistema de telefonía celular de segunda generación GSM/GPRS para la ciudad de Santiago de Chile con base en una aeroplataforma de mediana altitud tipo MAPs. Así se logran tasas binarias aproximadas de 26,5 Kbps para las tres zonas de cobertura de interés (UAC/SAC/RAC). Asimismo, se definen los ángulos de elevación del usuario para cada zona y su respectivo canal, ya sea Gaussiano/Ricean, Ricean o Rayleigh. También se realiza una comparación con una estructuración en basada en un sistema de espectro ensanchado CDMA con el objetivo de aumentar el número total de usuarios.

ABSTRACT

According to the current problematic that telecommunication entities involves based on cellular telephone systems for the total amount user per cell and maximum throughput, studies was realized based coding channels and no-coding channel according to code gain and actives users for cellular telephone system of second generation GSM/GRPS to Santiago city of Chile based Medium Altitude Platform Station MAPs, achieving about 26,5 Kbps bit rate per user for the three coverage zones (UAC/SAC/RAC), in the same way showing elevation angles per user in the coverage zones and their respective channels like a Gaussian/Rice, Rice or Rayleigh. Finally comparative is realized for CDMA system in order to increase the total number of users.

Palabras clave: **Throughput binario, Erlang, CDMA.**

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la comunicación digital inalámbrica en banda ancha, la necesidad actual de aumentar la velocidad de transmisión en una comunicación, los inconvenientes geográficos para una comunicación con LOS (Line of Sight) y la problemática del número de usuarios máximos dentro de un canal de transmisión, son los factores que motivan el desarrollo de este trabajo.

En Chile, existen variadas entidades que ofrecen servicios de comunicación inalámbrica terrestre. Sin embargo, conviven con los problemas geográficos del país, que impiden, en la mayor parte de los casos, una comunicación con LOS. Dicho inconveniente es solucionado por la tecnología MAPs (Medium Altitude Platform Station), la cual consiste en una aeroplataforma móvil-cautiva de mediana altitud o “Globo Antena”, situado a 4 mil metros de altura, permitiendo una comunicación inalámbrica digital en banda ancha con LOS, que proporciona un enlace más fluido con notables ventajas en velocidad, relación S/N (Señal/Ruido), eficiencia espectral, ayuda y cobertura en los momentos de emergencias y catástrofes.

Cabe destacar que existe una gran ventaja de los sistemas tipo MAPs, respecto a los actuales radio-enlaces terrestres con base en antenas, debido a la componente LOS presente en este canal. Esta generan una mejor recepción y asimismo una mayor velocidad de información, lo que implica un escenario de trabajo con un canal de distribución Gaussiana o, en estricto rigor, con una distribución Ricean.

1.1. Tecnología HAPS

La tecnología llamada HAPS se traduce en un globo estratosférico aerostacionario o móvil, que comprende tres fases diferenciadas, princi-

palmente, en la altitud de cada una ellas [1], [2].

- HAPs (High Altitude Platform Station): comprende una altura cercana a los 20 km. y un diámetro de cobertura que sobrepasa los 100 km. de longitud al utilizar una carga útil superior a 100 Kg en algunos casos [3].
- MAPs (Medium Altitude Platform Station): comprende una altura de 4 mil metros y un diámetro de cobertura de [40-50] km. aproximadamente.
- LAPs (Low Altitude Platform Station): trabaja a una altura cercana a los 400 metros y mantiene un radio de cobertura aproximado a los 300 metros.

A medida que aumentamos la altura de trabajo, el viento comienza a ser un factor de importancia considerable para cualquier aeroplataforma móvil-cautiva. La fuerza que ésta ejerce sobre la aeroplataforma es crítica, dentro de ciertos rangos de elevación.

La figura 1 ilustra la variación de la velocidad del viento respecto a la altura de trabajo. En ésta se aprecia que existe un rango que no es viable para este tipo de aeroplataformas [3].

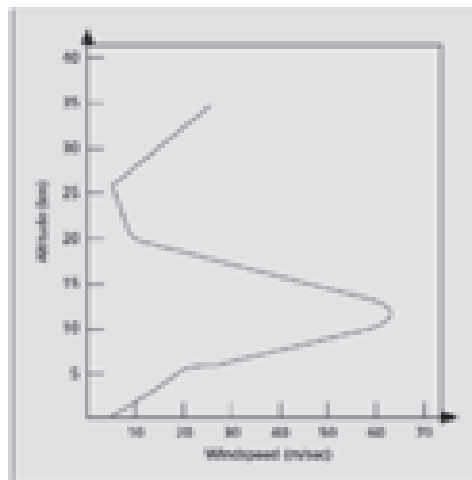


FIGURA 1 VELOCIDAD DEL VIENTO
VERSUS ALTURA DE TRABAJO [6].

Asimismo, la ITU-R (International Telecommunication Union) [1], [2] definió tres zonas de coberturas en base a la distancia hacia la aeroplataforma y el ángulo de elevación del usuario, como se puede apreciar en la figura

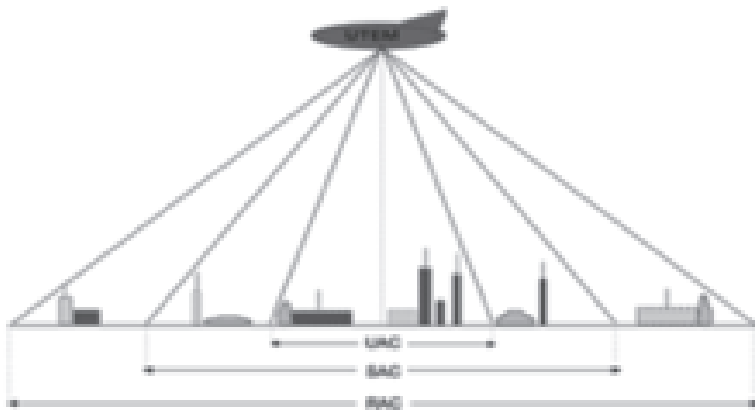


FIGURA 2 ZONAS DE COBERTURA PARA TECNOLOGÍA MAPS [39].

Donde:

- UAC: $[90^\circ - 30^\circ] - [0 - 6,9]$ km
- SAC: $[30^\circ - 15^\circ] - [6,9 - 14,9]$ km
- BAC: $[15^\circ - 11,3^\circ] - [14,9 - 20]$ km.

2. MODELO DE CANAL

El medio físico por el cual la señal es transportada genera diferentes tipos de perturbaciones o desvanecimientos que resultarán en una baja relación señal a ruido S/N o en recepción, disminución de la tasa binaria, o en su defecto, una tasa de error irreducible. Por lo tanto, se hace necesario realizar un profundo estudio del comportamiento del canal, ya sea en banda ancha o banda estrecha.

2.1. Caracterización en banda ancha

En este escenario, el receptor recibirá una sumatoria de señales desfasadas y de amplitud con comportamiento estocástico debido a los

multicaminos generados por el canal y por los efectos de reflexión [6], difracción, dispersión, etc. En relación a la dispersión no correlada de sentido amplio WSSUS impuesta por P. Bello en 1969, esta contempla la no correlación de las señales multicaminos y su comportamiento estacionario dentro del canal, implicando una dispersión temporal como se aprecia en la siguiente expresión:

$$r(t) = \sum_n \alpha_n(t) S[t - \tau_n(t)] \quad (1)$$

Donde τ_n es el desfase de una señal multicamino y α_n la amplitud de comportamiento estocástico.

2.2 Caracterización en banda estrecha

El constante movimiento de los elementos pertenecientes al canal produce una variabilidad temporal del medio perturbador o canal, generando un proceso multiplicativo de desvanecimientos a la señal transmitida [6]. Asimismo, un ruido blanco aditivo gaussiano AWGN asumido en recepción, como se aprecia en la siguiente expresión.

$$r(t) = [s(t) * f(t)] + n(t) \quad (2)$$

Donde $r(t)$ es la señal recibida luego de su viaje por el canal, $s(t)$ señal transmitida, $f(t)$ desvanecimientos generados por el canal y finalmente $n(t)$ constituye el AWGN asumido en recepción.

No obstante, el brusco cambio espacial entre transmisor y receptor, genera profundas pérdidas de la energía en el bit., y en su peor de los casos, tasas de error irreducibles en base a desvanecimientos de tipo rápido o, en el mejor de los casos, de tipo lento como se aprecia en figuras 3 y 4.

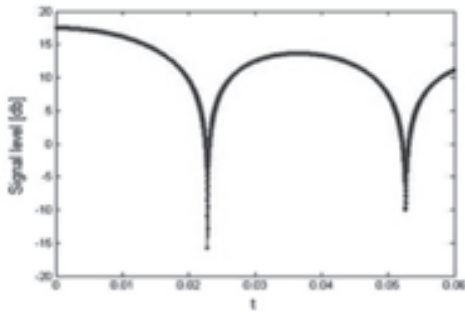


FIGURA 3 DESVANECIMIENTOS LENTOS PARA UN MÓVIL A 20KM/H CON F=1900 MHZ..

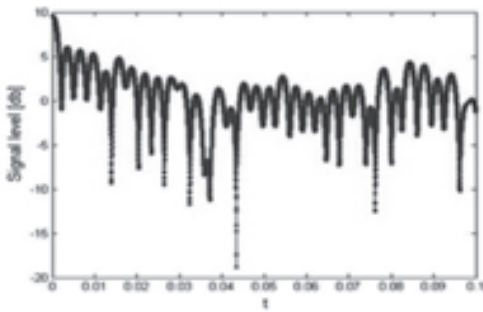


FIGURA 4 DESVANECIMIENTOS RÁPIDOS PARA UN MÓVIL A 100 KM/H CON F = 1900 MHZ.

La movilidad del usuario genera un corrimiento en frecuencia de la portadora. Por tanto, se genera una tasa de desvanecimientos con base en el efecto doppler debido a la velocidad del móvil, por el ángulo de elevación del usuario y la longitud de onda de la señal, como se aprecia en la expresión:

$$f_d = \frac{\Delta\theta}{2\pi\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos(\theta) \quad (3)$$

Se observa, entonces, que a medida que el ángulo de elevación del usuario móvil tiende a su máximo. E, es decir 90°, la tasa de fading f_d tiende a cero.

3. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN

En escenarios donde la señal en recepción no mantiene un estándar de calidad de servicio QoS

(Quality of Service), v. Vale decir, no satisface los requerimientos energéticos para mantener una velocidad de información dada, se hace necesario utilizar alguna técnica de mitigación que combata los desvanecimientos generados por el canal a fin de evitar un aumento en el probabilidad de error en el bit o, en su defecto, generar seguridad y eficiencia energética.

3.1 Codificación de canal

La codificación de canal involucra la adición de bits redundantes a la señal de información con el objeto de generar un mejor comportamiento frente a las ráfagas de error provocadas por el canal y, del mismo modo, eficiencia energética [9]. Dicha redundancia está en relación al con el número de bit de información k y el largo de la palabra de código generada n como se puede apreciar en la figura 3.

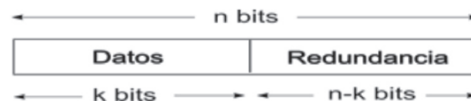


FIGURA 5 ESQUEMA PALABRA DE CÓDIGO (DATO + REDUNDANCIA) [9].

Asimismo, la figura 6 ilustra un esquema en bloques para un canal codificado, donde se aprecia claramente que el factor de redundancia se genera en la etapa del codificador y la tasa binaria está limitada a los valores que pueda tomar la redundancia n .

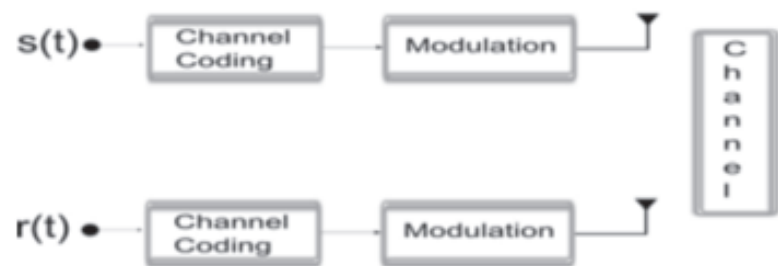


FIGURA 6 CADENA DE TRANSMISIÓN PARA UN CANAL CODIFICADO.

Por tanto, se obtiene:

$$R_s = \frac{R_c}{\log_2(M)} = \frac{n}{k} R_b \quad (4)$$

Donde R_s es la tasa de símbolo de la señal, R_c tasa de código, $\log_2(M)$ número de bit por símbolo y, finalmente, R_b el throughput binario para un canal codificado [5].

Del mismo modo, apreciamos las ventajas generadas por este tipo de canal respecto a un canal no codificado en torno a la ganancia de código y la eficiencia energética generada, como se ilustra en la figura 7.

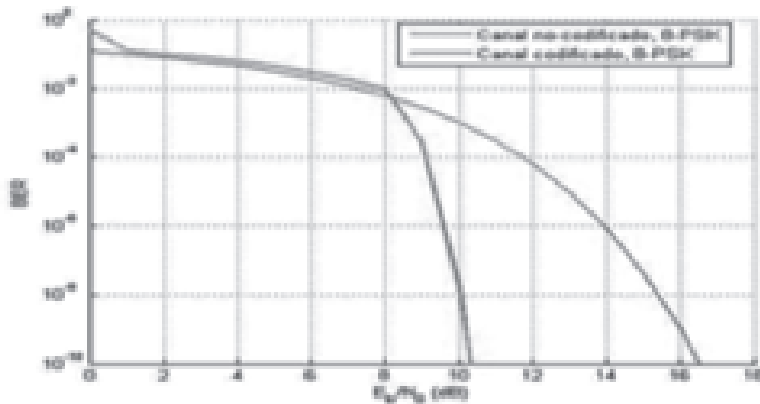


FIGURA 7 CURVA DE ERROR BER PARA UN CANAL NO-CODIFICADO Y CANAL CODIFICADO.

Apreciamos que para un canal codificado los requerimientos energéticos son menores respecto de un canal no codificado, esto en relación a la probabilidad de error en el bit, tal como lo muestra la expresión:

$$P_b \cong \frac{1}{n} \sum_{j=t+1}^n j \binom{n}{j} P_c^j (1 - P_c)^{n-j} \quad (5)$$

El factor n está en relación al largo de la palabra de código generada por el algoritmo de codificación y la variable t es el número máximo de bit corregidos, que genera dicho algoritmo [5], [6].

4. TELEFONÍA CELULAR

En la actualidad coexisten dos tipos de generaciones de telefonía celular: la segunda generación 2G y la tercera generación 3G, las cuales se diferencian, principalmente, en la evolución de velocidad de información, la cual sigue las distintas tecnologías y estándares utilizados, tal como lo indica la tabla 1.

GSM	GPRS	EDGE	UMTS
TDMA	TDMA	TDMA	CDMA
9 Kbps	150 Kbps	384 Kbps	≥ 2 Mbps
.....	HSDPA
.....	CN	CN	CN
.....	WEB	WEB	WEB

TABLA 1 EVOLUCIÓN DE TELEFONÍA CELULAR.

donde CN (Core Network), Web referente al acceso a internet, HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) y TDMA/CDMA son técnicas de acceso al medio [10].

4.1. Marco teórico

La planificación celular para una zona de cobertura dada, se desarrolla en una división de plano en sectores denominados celdas, las cuales en conjuntos representan un clúster. Éste, a su vez, mantiene todo el ancho de banda del sistema [10]. Es decir, se puede generar un reúso de frecuencias para aumentar el número de usuarios simultáneos en un canal dado, como se aprecia en la figura 8.

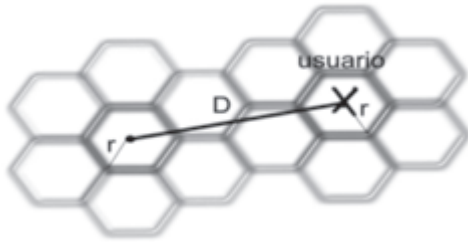


FIGURA 8 REÚSO DE FRECUENCIAS EN BASE A 2 CLÚSTER.

Aquí los usuarios podrán utilizar portadoras con las mismas frecuencias para celdas co-canal, lo que en consecuencia genera una distancia co-canal que está en el radio de la celda y el factor de reúso. Es decir, el número de celdas con contiene 1 clúster.

$$(6) \quad D = R\sqrt{3K}$$

Sin embargo, al utilizar portadoras con las mismas frecuencias, inevitablemente se generara interferencia entre celdas co-canal, las cuales están en relación al factor CIR (Carrier Interference Rate).

$$(7) \quad CIR = \frac{S}{I} = \frac{P}{R^Y * P \sum_M \frac{1}{D_M^Y}} = \frac{1}{M} * \left[\frac{D}{R} \right]^Y$$

5. RESULTADOS

En torno a la disposición territorial de la ciudad de Santiago de Chile, escenario de trabajo para la aeroplataforma de mediana altitud MAPs, se aprecian las siguientes características:

- 37 comunas
- 40 km. de longitud de diámetro
- 500 m sobre el nivel del mar
- 6.683.652 habitantes [x]

Las tres zonas de coberturas se definieron en base a la distancia respectiva de la aeroplatafor-

ma, y en consecuencia, los respectivos canales de transmisión.

El plano de cobertura fue analizado tomando en cuenta la planificación celular en relación al número total de celdas, distancia co-canal, factor de reúso de frecuencias y, por consiguiente, el total de antenas en la bandeja de transmisión.

Factor de reúso k	7
N° total de clúster	3
Total de celdas	21
Total de antenas	21
Potencia de transmisión	6 [w]
Distancia co-canal	22,91 [Km]
Radio de celda	5 [Km]
CIR (Caso ideal)	23,43 [db]
CIR (Peor caso)	19,15 [db]
Altura MAPs	4 [Km]
Diámetro cobertura	40 [Km]

TABLA 2 PLANIFICACIÓN CELULAR EN SANTIAGO DE CHILE.

Asimismo, se aprecia en la figura 8 la disposición territorial de cada comuna y la configuración de celdas para la zona de cobertura.

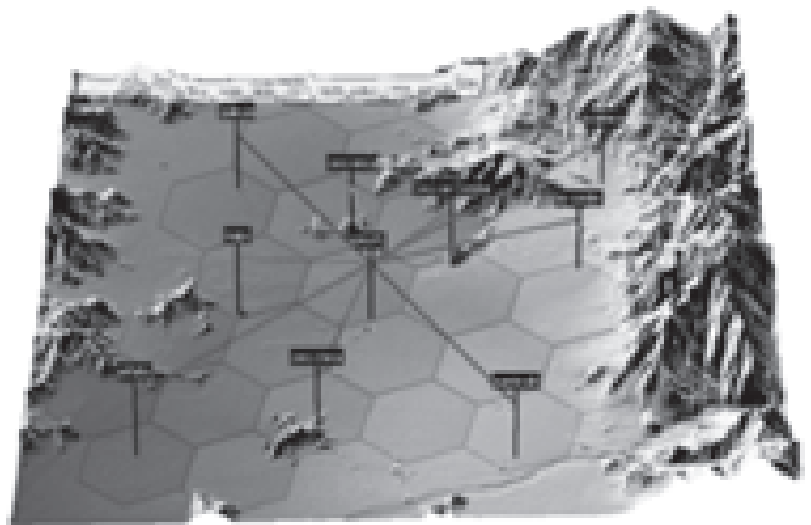


FIGURA 9 ZONA DE COBERTURA 3D PARA LA CIUDAD DE SANTIAGO CON BASE EN SOFTWARE RADIO MOBILE.

5.1 Throughput binario

Para las distintas zonas de cobertura (UAC/SAC/RAC) en la ciudad de Santiago, la relación señal a ruido S/No, a medida que el usuario móvil se aleja de la aeroplataforma, decrementará generando un aumento en la probabilidad de error en el bit y, además, una limitante en el throughput binario de acuerdo al teorema de Shannon, como se expresa a continuación:

$$(8) \quad C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

donde W representa el ancho de banda, S/No la relación señal de ruido AWGN y, del mismo modo, la eficiencia espectral definida por el aumento del número de bit por símbolo M para cada modulación digital [5]. Por tanto, la capacidad binaria lograda para las tres zonas de cobertura queda expresada en la tabla 3:

Zona cobertura	Modulacion	Throughput binario [Kbps]
UAC	BPSK	BPSK
	QPSK	QPSK
	8-QAM	8-QAM
SAC	16-QAM	16-QAM
	BPSK	BPSK
	QPSK	QPSK
RAC	8-QAM	8-QAM
	16-QAM	16-QAM
	BPSK	BPSK
	QPSK	QPSK
	8-QAM	8-QAM
	16-QAM	16-QAM

TABLA 3 THROUGHPUT BINARIO POR ZONA DE COBERTURA PARA CANAL NO-CODIFICADO.

Throughput binario por zona de cobertura para canal no-codificado.

Zona	Codificación	Modulación	Tasa binaria [Kbps]
UAC	RS	BPSK	53703,17
	BCH	BPSK	39536,66
	BCH	8-QAM	23442,28
SAC	BCH	16-QAM	19275,25
	RS	BPSK	1513,56
	BCH	BPSK	1114,29
RAC	BCH	8-QAM	660,69
	BCH	16-QAM	543,25
	RS	BPSK	660,69
	BCH	BPSK	486,4
	BCH	8-QAM	288,4
	BCH	16-QAM	237,13

TABLA 4 THROUGHPUT BINARIO PARA CANAL CODIFICADO.

Se aprecia el aumento de tasa binaria para un canal codificado a consecuencia del incremento de ancho de banda por portadora para las tres zonas de cobertura, y una ganancia de código de, aproximadamente, 4 [db], implicando un incremento en eficiencia energética de 54,6 [db]. Importante detalle debido a la directa proporcionalidad que mantiene con el tiempo de servicio activo de la aeroplataforma.

Para las tres zonas de cobertura se realizaron análisis con base en el total de usuarios erlang y en la utilización de un 0,05 de carga por suscriptor, lo que implica un 5% de demanda activa por parte de un usuario y los respectivos requerimientos de ancho de banda por sector, como se aprecia en tabla 5:

Zone	Bit rate/ user [Kbps]	BW [KHz]	Erlang
UAC	26,235	429863	14329
SAC	26,553	12115,2	399
RAC	26,42	5288,5	175

TABLA 5 RESULTADOS ERLANG, TASA BINARIA POR USUARIO Y ANCHO DE BANDA PARA CADA ZONA DE COBERTURA.

Por tanto, el sistema de telefonía soporta 14.903 usuarios activos con un requerimiento de banda total de 447,26 [MHz], lo que implica un total de 298.060 abonados para la ciudad de Santiago de Chile.

5.2. Comparativa con sistema de espectro ensanchado cdma

Al utilizar técnicas de espectro ensanchado CDMA, cada usuario podrá utilizar toda la banda a disposición durante todo el tiempo, por la multiplicación de la señal transmitida por un código chips, el cual genera un decremento de la densidad espectral de potencia bajo el piso de ruido. A su vez, es menos susceptible a interferencias creadas por usuarios y celdas aledañas, a diferencia de otros tipos de técnicas de acceso al medio, asumiendo el total erlang sobre una celda.

Entonces, generamos un total de 312.963 erlang y, en relación a un factor de carga por suscriptor de 0,05, se logra un total de 6.259.260 suscriptores para la ciudad de Santiago. Esto abarcaría un 93,6% de la población total.

REFERENCIAS

Revistas:

[1] **Rec. ITU-R F.1819**. "Protection of the radio astronomy service in the 48.94-49.04 GHz band from unwanted emission from HAPs in the 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz bands".

[2] **ECC Report 156**. "Conditions for possible co-existence between HAPs gateway link and other services/system in the 5850-7075 MHz band". Cardiff, January 2011.

Libros:

[3] **Stylios Karapantazis, Fontini-Niovi Pavlidou**. "Broadband Communication Via High Altitude Platform: A Survey". IEEE Communications Surveys & Tutorials • First Quarter 2005, 1553-877X.

[4] **John G. Proakis**. "Digital Communication". McGraw-Hill, New York, third edition, 1995.

[5] **Bernard Sklar**. "Digital Communications: Fundamentals and Applications". Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1988.

[6] **Bernard Sklar**. "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems", Part I Characterization. IEEE Communication magazines, July 1997. 0163-6804/97, 1997 IEEE.

[7] **Bernard Sklar**. "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems", Part II Mitigation. IEEE Communication magazines, July 1997 IEEE. 0163-6804.

[8] **Goran M. Djuknic, John Freidenfelds**. "Establishing Wireless Communications Services Via High Altitude Aeronautical Platform: A Concept Whose Time Has Come?" IEEE Communications Magazines, September 1997. 0163-6804.

[9] **Alister Burr**. "Modulation and Coding for Wireless Communications". Prentice Hall/Pearsons Education, New York, 2000.

[10] **Oriol Sallent Roig**. "Principios de Comunicaciones Móviles". Universitat Politècnica de Catalunya, Septiembre 2003.

Santiago Zapata Cáceres

*Departamento de Informática y
Computación, Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica de Chile
szapata@utem.cl

Julio Valdes H.

*Departamento de Informática y
Computación, Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica de Chile
jvaldesh@gmail.com

REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN PREDICCIÓN DE SERIES DE TIEMPO: UNA APLICACIÓN A LA INDUSTRIA

RESUMEN

Las redes neuronales han sido utilizadas exitosamente en muchos tipos de problemas de predicción debido a que son capaces de modelar y predecir series de tiempo, lineales y no lineales, con un alto grado de precisión, además de capturar cualquier tipo de interrelación entre los datos y no requerir conocimiento previo respecto del problema que se está modelando.

Esta investigación se centra en evaluar la capacidad que presentan las redes neuronales artificiales en la predicción de series de tiempo, estudiando dos series tomadas del campo de la industria: Generación de Electricidad Mensual y Consumo Mensual de gas natural. Los modelos de redes neuronales obtenidos deben ser capaces de predecir el siguiente periodo de acuerdo a periodos pasados.

Los resultados obtenidos en cada serie dan cuenta de la gran capacidad que tienen las redes neuronales aplicadas en la predicción de series de tiempo, obteniéndose un error absoluto medio porcentual de predicción inferior al 3% en la serie Generación de Electricidad Mensual

e inferior al 5% en la serie Consumo Mensual de Gas Natural.

Palabras clave: **Redes Neuronales, Serie de tiempo, Predicción.**

1. INTRODUCCIÓN

La predicción de series de tiempo o predicción de series temporales es un área de investigación de mucho interés que está en desarrollo desde hace varias décadas. En especial, en las últimas tres décadas ha aumentado el interés en esta área dado el progreso en las Tecnologías de Información (TI), específicamente respecto de las mejores capacidades de procesamiento por parte de los computadores, lo que permite realizar cálculos complejos en algunos minutos o incluso en algunos segundos. Este aumento de interés se ve reflejado por la diversidad de sus aplicaciones en diferentes disciplinas, variando desde la economía a la ingeniería, donde la predicción de series de tiempo es un campo de investigación activo e importante actualmente y se estima que lo continuará siendo en el futuro [1].

La predicción de series de tiempo considera la siguiente hipótesis: dado un conjunto discreto de datos con respecto al tiempo y correspondientes a un mismo fenómeno, los valores futuros son dependientes de los valores pasados. Es decir, buscando en los valores pasados de una serie de tiempo, se puede predecir su comportamiento en el futuro.

La gran importancia que tiene el llevar a cabo predicciones precisas de los valores futuros, hace necesario dedicar recursos a la investigación para la obtención de herramientas de pronósticos más exactos. Una predicción más precisa en la demanda de un producto permitirá optimizar la cadena de abastecimiento y, de esta forma, tener en stock la cantidad necesaria para vender sin perder ventas ni tampoco almacenar en bodega productos que no serán necesarios. Una mejor predicción del consumo de electricidad para una región es vital, dado que ayudará en la toma de decisiones sobre qué cantidad producir para un lugar determinado en un periodo específico, utilizando los recursos energéticos necesarios, minimizando costos operacionales para las estaciones eléctricas. De la misma forma, una predicción precisa de los índices bursátiles en el futuro permitirá tomar decisiones sobre la venta o compra de acciones en el momento exacto. Existen muchos ejemplos de series temporales que han sido objeto de análisis para predecir los valores futuros, principalmente en las áreas de la ciencia, finanzas, comercio e industria.

Durante las últimas décadas se han utilizado principalmente métodos estadísticos clásicos para realizar la predicción de series de tiempo, siendo los métodos de Holt-Winters (1960) y Box y Jenkins (1976) los más utilizados. Estos métodos son fáciles de desarrollar e implementar, y relativamente fáciles de comprender e interpretar [11]. Pese a que se obtienen resultados satisfactorios aplicando estos métodos a series de tiempo lineales, al utilizarlos en series no lineales, las cuales son comunes en situaciones

del mundo real, se presentan limitaciones porque no son capaces de capturar las relaciones no lineales de los datos.

Dado que muchas de las series de tiempo que son de interés de análisis tienen una naturaleza no lineal, se hace necesario utilizar otras técnicas fuera de las clásicas para realizar la predicción de éstas y así obtener modelos más eficientes. En los últimos años las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han sido exitosamente aplicadas como herramienta en la predicción de series de tiempo en un amplio rango de problemas en áreas de comercio, industria y ciencia [1]. Las RNA son una rama de la Inteligencia Artificial que consiste en el aprendizaje y procesamiento automático, inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso biológico. El objetivo de la utilización de RNA es conseguir respuestas similares a las que es capaz de dar el cerebro, que se caracterizan por su generalización y robustez. Las RNA son útiles en la predicción de series de tiempo dado que a diferencia de los métodos estadísticos clásicos, son capaces de capturar las relaciones lineales y no lineales entre los datos debido a su estructura no lineal que permite un modelo con más grados de libertad.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo general de esta investigación es evaluar la capacidad de las Redes Neuronales Artificiales como herramienta de predicción, mediante el análisis de distintas configuraciones, utilizando el tipo de Red Neuronal más comúnmente utilizado en problemas de predicción: Perceptrón Multicapa y los algoritmos de aprendizaje Backpropagation y Resilient Propagation.

2.1 Estado del Arte

La Inteligencia Artificial (IA) se ha establecido como un área de la ciencia del conocimiento que consiste en el aprendizaje y procesamiento

automático de la información, inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso biológico. Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) constituyen una rama importante dentro de la IA, y tienen como objetivo resolver un problema determinado basado en la simulación de un sistema neuronal biológico simplificado. Es decir, el conocimiento es adquirido mediante un método de aprendizaje a partir de datos representativos del problema en cuestión y se genera una solución a éste.

Los modelos de RNA no requieren de un especialista en el problema para llegar a la solución de éste, debido a que los métodos de aprendizaje utilizados son capaces de “aprender de la experiencia”, reconociendo de buena forma los patrones existentes en los datos. Por lo tanto, no es necesario conocer las reglas que determinan la solución del problema, sino que mediante un acercamiento de caja negra, el modelo neuronal ajusta cada uno de sus parámetros de manera de ofrecer un modelo que sea capaz de reconocer los patrones presentados, tolerar errores y generalizar ante datos que no fueron presentados.

Pese a que el estudio de las capacidades cognitivas se ha realizado hace cientos de años, fue en el año 1943 cuando Warren McCulloch y Walter Pitts publican un trabajo seminal, en el que tratan de explicar el funcionamiento de las neuronas biológicas mediante un acercamiento computacional, sentando las bases necesarias para dar origen a la computación neuronal y constituyéndose en los primeros en tratar al cerebro como un organismo computacional. En este trabajo, McCulloch y Pitts describen a una neurona, mediante circuitos eléctricos, como un dispositivo binario que puede estar activado o desactivado, y que puede tener varias entradas y una salida activada.

Aunque la teoría de McCulloch y Pitts no tuvo suposiciones muy acertadas sobre el funcio-

namiento neuronal, ha sido fundamental en el desarrollo de las ciencias de la computación [2].

En el año 1949, Donald Hebb publica un libro titulado “The Organization of the Behaviour” en el que propone lo que sería conocido como regla de Hebb o aprendizaje de Hebb, que intenta dar una respuesta a la interrogante: ¿cómo se produce el aprendizaje? La idea principal de esta publicación sostiene que el conocimiento es representado en el cerebro mediante la activación simultánea de un conjunto de neuronas. Otro de los puntos fuertes en esta publicación dice relación con que dado que la conexión entre las neuronas se realiza en la sinapsis, los cambios producidos en un proceso de aprendizaje se verán reflejados en ésta, más concretamente Hebb sostiene que el área de unión sináptica es incrementada al producirse una sinápsis [2].

En el año 1958, Frank Rosenblatt publica el libro “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”, en el cual formaliza las bases teóricas del perceptrón producto de las investigaciones realizadas. El perceptrón consiste en el siguiente modelo de neurona, luego del modelo presentado por McCulloch y Pitts, el cual puede ser visto como un clasificador lineal.

En el año 1959, Bernard Widrow y Marcian Hoff desarrollaron los modelos llamados “Adaline” y “Madaline”. Adaline (Adaptive Linear Elements) fue desarrollado para reconocer patrones binarios, de manera que, leyendo un conjunto de bits desde una línea de teléfono, se pueda predecir el bit siguiente. Madaline (Multiple Adaline) fue la primera red neuronal aplicada a un problema del mundo real, la eliminación de ecos en las líneas telefónicas mediante el uso de filtros adaptativos. El gran aporte que se reconoce a Widrow y a Hoff es el desarrollo de un método matemático para ajustar los pesos de la red, dado que hasta entonces los pesos

eran ajustados de manera aleatoria mediante un proceso de ensayo y error. Este método consiste en minimizar el error cuadrado medio entre la salida de la red neuronal y el valor objetivo deseado.

En el año 1969, Marvin Minsky y Seymour Papert publican el libro “Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry”, en el cual se realiza un análisis profundo sobre el perceptrón y se plantean las capacidades y los límites de estos. Particularmente, se plantea la limitación de la aplicabilidad del perceptrón a tramas que no son linealmente separables. Los perceptrones sólo pueden reconocer tramas si éstas son linealmente separables.

Dado que existen muchos problemas en los cuales las tramas no son linealmente separables, se produce una caída en las investigaciones e, incluso, para algunas personas esto significaba el final de quince años de investigación sobre las redes neuronales. Pese a esto, algunos investigadores siguieron trabajando.

En el año 1972, James Anderson comienza las publicaciones sobre modelos de memorias asociativas entre los que destaca el autoasociador lineal, conocido como modelo Brain-State-in-a-Box (BSB). En este mismo año, Teuvo Kohonen realiza desarrollos en el área de la clasificación de patrones de una manera paralela a Anderson, trabajando independientemente. La red que obtuvo Kohonen como resultado fue una red idéntica a la propuesta por Anderson.

En el año 1974, Paul Werbos desarrolla un método capaz de solucionar problemas en el cual los datos no son linealmente separables. Este método es conocido como “algoritmo de backpropagation” y fue luego desarrollado de forma independiente por David Parker en el año 1985 y por David Rumelhart y James McClelland en el año 1986, simultáneamente.

El algoritmo de backpropagation es una generalización del algoritmo propuesto por Widrow y Hoff, que permite que los perceptrones sean entrenados en una configuración multicapa y consiste en la “propagación hacia atrás” del error cuadrado medio partiendo por las neuronas de la capa final hasta llegar a la capa inicial. Una red neuronal multicapa consiste de la conexión de neuronas en niveles o capas, y luego cada nivel es conectado al nivel siguiente. Con esta forma de entrenamiento fue posible resolver muchos problemas complejos y las redes neuronales tomaron un interés cada vez más creciente en el campo de la industria.

En el año 1982, John Hopfield desarrolla un trabajo en el que presenta un modelo de redes neuronales que serán conocidas como “Redes de Hopfield”. Las Redes de Hopfield son capaces de almacenar ciertos patrones en memoria de una manera similar al cerebro.

En el año 1986 Rumelhart y McClelland publican el libro “Parallel Distributed Processing” en los cuales formalizan el algoritmo de Backpropagation dedicando un capítulo completo a este tema.

En el año 1985, el Instituto Americano de Física realiza la primera conferencia anual sobre Redes Neuronales para la Computación, y en el año 1987 el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos realiza la primera Conferencia Internacional sobre Redes Neuronales con más de mil asistentes.

Luego de estos acontecimientos, y principalmente por los buenos resultados que se comenzaron a obtener con el uso de redes neuronales multicapas y el algoritmo de backpropagation, varios libros y conferencias se realizan aumentando hasta el día de hoy el interés en este campo de investigación.

Neurona biológica

Las neuronas biológicas son células nerviosas que constituyen los elementos primordiales del sistema nervioso central. Una neurona es capaz de recibir información desde miles de otras neuronas, procesarla y luego generar una nueva información que enviará a otras neuronas con las que está conectada. Se estima que el cerebro está compuesto por más de diez billones de neuronas y que cada una está conectada a más de diez mil neuronas. Una neurona biológica está compuesta de: cuerpo celular o soma, axón y múltiples dendritas, como se muestra en la Figura 2.1. Las dendritas actúan como elementos receptores que captan las señales provenientes desde otras neuronas y las llevan al cuerpo celular. El axón actúa como elemento de salida por el cual se envía la información desde el cuerpo celular a otras neuronas mediante la sinapsis, que es la conexión entre las neuronas en la que se produce un intercambio químico que puede producir la excitación o inhibición de la neurona receptora. El cuerpo celular de la neurona es donde se realiza el procesamiento de las señales entrantes.

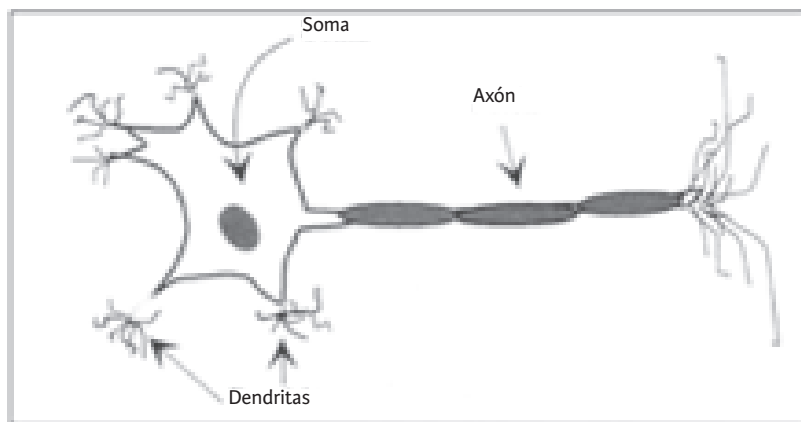


FIGURA 2.1 ESQUEMA DE UNA NEURONA BIOLÓGICA.

Neurona Artificial

Una neurona artificial o procesador elemental es una abstracción de una neurona biológica que opera como una unidad de procesamiento de información que es fundamental para la operación de una red neuronal. Una neurona artificial está compuesta de: un conjunto de entradas, un conjunto de pesos sinápticos, un "cuerpo celular" y una salida como se muestra en la Figura 2.2. El conjunto de entradas corresponde a los valores que son presentados a la neurona como si se tratase de las dendritas en la versión biológica. Los pesos sinápticos corresponden a las ponderaciones de cada entrada y representan en un modelo neuronal artificial el conocimiento de la neurona. La salida corresponde a la información que es enviada desde la neurona hacia las otras neuronas con las cuales existe sinapsis, como si se tratase del axón en la versión biológica. El "cuerpo celular" es el encargado de realizar el procesamiento de la información que proviene del conjunto de entradas y entregarla a la salida. El "cuerpo celular" está compuesto de una función de red y una función de activación.

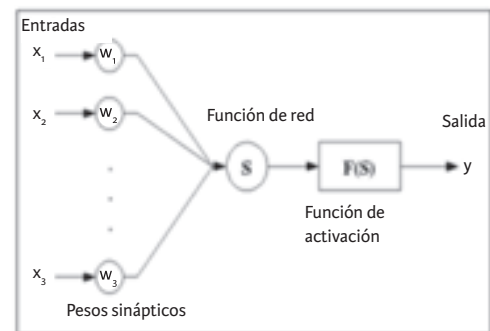


FIGURA 2.2 ESQUEMA DE UNA NEURONA ARTIFICIAL.

a) Pesos sinápticos

Los pesos sinápticos son un conjunto de valores asociados con cada una de las entradas, y son ajustados mediante el uso de un algoritmo de aprendizaje con el objetivo de plasmar en ellos el conocimiento de un problema determinado. Los pesos sinápticos se representan matemáticamente como un vector W , donde w_i es el peso correspondiente a la entrada i -ésima de la neurona.

b) Función de red

La función de red, también conocida como función de propagación, calcula el valor base en la neurona de acuerdo al conjunto de entradas y pesos sinápticos relacionados, siendo la más utilizada la Función de Base Lineal (FBL), que consiste en la sumatoria de las entradas ponderadas con los pesos sinápticos. La función de red FBL para un procesador elemental j al que están conectadas n entradas se puede definir formalmente como:

$$F(X, W_j) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_{ij}$$

donde X es el vector de entradas, W_j es el vector de pesos sinápticos que une a las entradas con el procesador elemental j e i es el índice que identifica a cada entrada desde 1 hasta n .

Otra función de red es la utilizada en Redes Función de Base Radial (FBR), y consiste en determinar el valor de red calculando la distancia a un determinado punto de referencia. La función de red FBR para un procesador elemental j al que están conectadas n entradas se puede definir formalmente como:

$$F(X, W_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ij})^2} \quad \text{c)}$$

c) Función de Activación

La función de activación, también conocida como función de salida, es considerada como una de las características más importantes de una neurona artificial, dado que representa el comportamiento de ésta. Esta función es la encargada de calcular el estado de activación de la neurona en base al resultado entregado por la función de red. Generalmente los resultados entregados por la función de activación se encuentran en el intervalo $[-1, 1]$ o $[0, 1]$, donde un estado de actividad completa es representado por el valor 1 y un estado de inactividad completa por 0 o -1.

Redes Neuronales Artificiales

Una Red Neuronal Artificial (RNA) es un paradigma de procesamiento de la información que es inspirado en el modo en que un sistema nervioso biológico, como el cerebro, procesa la información. Una RNA está compuesta por un conjunto de neuronas artificiales o procesadores elementales, los cuales, interconectados de alguna manera, trabajan para obtener la solución de un problema específico. En la literatura existen diversas definiciones para una RNA, pero una de las más certeras con el propósito de resumir su todo es la siguiente:

“Una Red Neuronal es un conjunto de procesadores elementales interconectados, no lineal ni estacionario, que realiza al menos alguna de las siguientes funciones: Aprendizaje, Memorización, Generalización o Abstracción de características esenciales, a partir de un conjunto de ejemplos” [12].

Las neuronas artificiales o nodos pueden clasificarse, de acuerdo a su funcionalidad, de la siguiente forma:

- Nodos de entrada: son los encargados de recibir las señales o información desde el ex-

terior de la red. No realizan procesamiento de la información.

- **Nodos de salida:** son los encargados de enviar la salida de la red neuronal hacia el exterior de ésta. Pueden realizar procesamiento de la información.
- **Nodos ocultos:** son los encargados de realizar el procesamiento de la información y, con esto, realizar el aprendizaje. Reciben la información desde los nodos de entrada y la envían a los nodos de salida.

Se conoce como capa o nivel a un conjunto de neuronas del mismo tipo, ya sea de entrada, salida u oculta. Toda RNA incorpora una capa de entrada, una capa de salida y una o más capas ocultas.

En el estudio de las RNA deben considerarse tres aspectos fundamentales: la arquitectura, el aprendizaje y la capacidad de generalización de la red [13].

a) Arquitectura de red

El término arquitectura de la red está relacionado con el diseño estructural de la red y busca determinar los siguientes elementos: la cantidad de entradas y salidas, la cantidad de nodos ocultos, la función de red y de activación asociada a cada nodo, la forma en que los nodos están interconectados, la dirección que sigue la información, y la selección de un conjunto de datos adecuado para realizar el entrenamiento y la validación del modelo obtenido.

Cantidad de nodos de entrada y salida

La determinación del conjunto de datos de entrada y de salida de la red depende exclusivamente del problema que se busca resolver. La cantidad de entradas y de salidas que necesite el problema en cuestión determinará la canti-

dad de nodos de entrada y de salida de la red respectivamente. Es una práctica común realizar un análisis de los datos tanto de entradas como de salida, para escalarlos y/o preprocesarlos. Por lo general, el escalamiento se realiza en el intervalo $[0, 1]$ o $[-1, 1]$ y el pre-procesamiento consiste en aplicar algún método estadístico que permita capturar la información relevante de los datos de entrada y desechar la restante. Si se ha realizado un escalamiento de los datos de entrada, se debe realizar una operación de desnormalización con los datos de salida para volver a su estado original los datos que fueron escalados.

Cantidad de nodos ocultos

La cantidad de capas ocultas se determina de acuerdo a la complejidad del problema. En la mayoría de los problemas basta con utilizar una sola capa oculta, pero si no se consiguen buenos resultados puede intentarse utilizando más de una. La cantidad de nodos para una capa cualquiera se determina por lo general por ensayo y error, variando la cantidad de nodos entre $n/2$ y $2n$, por lo general, siendo n el número de nodos de la capa anterior.

Función de red

La función de red o de propagación es estándar para la gran mayoría de los problemas, utilizándose la Función de Base Lineal, que consiste en las sumas de las entradas ponderadas con los pesos sinápticos correspondientes.

Función de activación

La elección de la función de activación depende exclusivamente del problema que se intente resolver. Si el problema es de clasificación es común utilizar la función Umbral. Si el problema es de aproximación es común utilizar la función Umbral-Lineal en las capas de entrada, la función Sigmoide o la Tangente Hiperbólica en las capas

ocultas y la función Umbral-Lineal o Sigmoide en la capa de salida

Interconexión

La interconexión de una red se refiere a la forma en que se producen las conexiones entre las neuronas agrupadas en capas. Se pueden distinguir dos tipos de interconexiones entre capas:

- Totalmente conectadas: las salidas de los nodos de una capa cualquiera están conectadas a todos los nodos de otra capa.

- Parcialmente conectadas: las salidas de los nodos de una capa cualquiera están conectadas a un grupo de nodos de otra capa y no a todos.

Dirección de la información

La dirección de la información se refiere al flujo que sigue la información en la red neuronal. Se pueden distinguir tres tipos redes con respecto a la dirección:

- Redes de alimentación hacia adelante: el flujo de la información siempre es desde una capa a la siguiente, es decir, va desde la capa de entrada, pasa por las capas ocultas para finalizar en la capa de salida, como se muestra en la Figura 2.8. Ejemplo de este tipo de redes es el Perceptrón Multicapa.

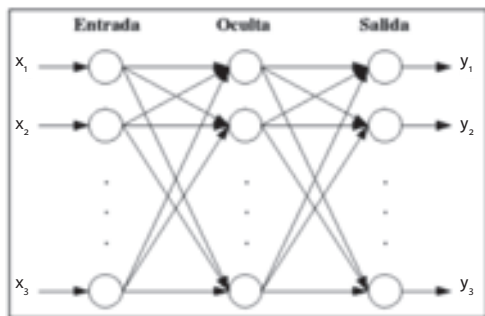


FIGURA 2.8 RED DE ALIMENTACIÓN HACIA DELANTE

- Redes de alimentación hacia atrás: el flujo de la información puede ir desde una capa a capas anteriores, como se muestra en la Figura 2.9. Ejemplo de este tipo de red son las Redes Recurrentes.

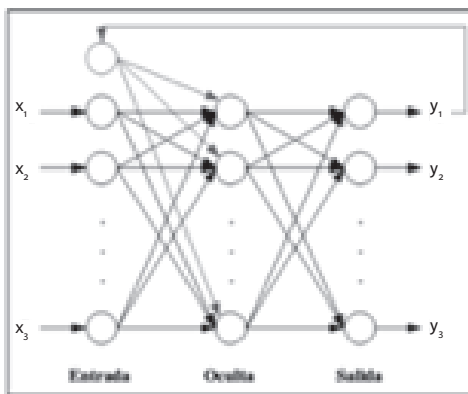


FIGURA 2.9 RED DE ALIMENTACIÓN HACIA ATRÁS

- Redes de alimentación lateral: puede existir conexiones entre neuronas de la misma capa, como se muestra en la Figura 2.10.

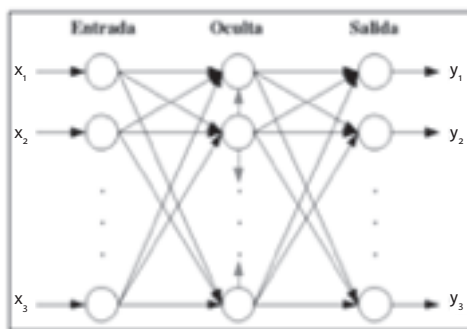


FIGURA 2.10 RED DE ALIMENTACIÓN LATERAL

- Selección de datos para entrenamiento y validación. Se debe determinar un conjunto de datos que sea completamente representativo del problema a solucionar. Por lo general, se utiliza el 80% de los datos para realizar el entrenamiento de la red, y el 20% restante para realizar la validación del modelo obtenido. De esta forma, se presenta el 80% para que se lleve a cabo el aprendizaje del problema en cuestión y luego se presenta el 20% restante de los datos, para verificar si realmente el modelo entrega

resultados aceptables al presentarle patrones que pueden ser desconocidos.

b) Aprendizaje

El aprendizaje o entrenamiento es el proceso en el cual los pesos sinápticos de la red son ajustados con el objetivo de capturar la información que se presenta, y de esta forma obtener respuestas adecuadas. Este proceso básicamente consiste en la presentación de un conjunto de datos, conocido como conjunto de patrones de entrenamiento, un número determinado de veces, conocido como ciclos, hasta que se produzca uno de los siguientes eventos:

- El error entre la salida de la red y la deseada alcance un valor aceptable.
- Se alcance el número máximo de ciclos.

El aprendizaje se lleva a cabo mediante el uso de algoritmos de entrenamientos. Los algoritmos de aprendizaje se pueden clasificar en dos tipos: supervisados y no supervisados.

Algoritmos Supervisados

En los algoritmos supervisados, un conjunto de patrones de entrada y uno de patrones de salida son presentados a la red, de esta forma el conjunto de datos de entrenamiento está formado por el par (entradas, salida). El aprendizaje consiste en la modificación de los pesos sinápticos de manera de reducir la diferencia entre la salida de la red con la salida deseada. De acuerdo a la forma en que se ajustan los pesos sinápticos, este tipo de algoritmos se pueden clasificar en:

- Algoritmos de aprendizaje por minimización del error: se busca modificar los pesos de forma que se reduzca la diferencia entre la salida calculada por la red y la salida esperada. Se utiliza, por lo general, el error cuadrático medio como

medida de la diferencia entre las salidas.

- Algoritmos de aprendizaje por refuerzo: busca minimizar el error al igual que el algoritmo anterior. Para esto, refuerza los pesos para resultados satisfactorios y penaliza los pesos para resultados malos. Este tipo de algoritmos se utiliza en casos en los que se dispone de información global sobre los patrones de entrenamiento, por ejemplo si son correctos o incorrectos.

- Algoritmos de aprendizaje estocástico: los pesos son modificados de acuerdo a cambios por lo general aleatorios, y luego es evaluado su efecto de acuerdo al resultado esperado.

Algoritmos no Supervisados

En los algoritmos no supervisados, un conjunto de patrones de entrada solamente es presentado a la red, formando el conjunto de datos de entrenamiento. De esta forma, el aprendizaje se realiza con base en los patrones de entrada, sin ser necesario indicar las salidas deseadas. Estos algoritmos de aprendizaje extraen ciertas propiedades de los patrones presentados y los agrupan en categorías de patrones similares. Los pesos sinápticos son modificados de manera tal que si se presentan dos patrones de datos similares se produzca la misma salida. En este tipo de algoritmos se pueden distinguir dos tipos de redes:

- Redes de pesos fijos: los pesos sinápticos son preestablecidos y precalculados, por lo que no son adecuadas para utilizarlas en ambientes dinámicos. Las redes de Memoria Asociativa y las redes de Hopfield son ejemplos de este tipo de redes.
- Redes de aprendizaje competitivo: se realiza una competencia entre las neuronas y sólo se activan los pesos de la neurona ganadora. Las redes de auto-organización de Kohonen son un ejemplo de este tipo de redes.

c) Capacidad de Generalización

La capacidad de generalización de una red tiene relación con la recuperación de la información que es almacenada en los pesos de las conexiones durante el entrenamiento, evaluando los resultados con un conjunto de datos diferente del utilizado en el proceso de aprendizaje, en el que pueden existir patrones diferentes. Se espera que cuando se presenten patrones que no han sido enseñados a la red, ésta sea capaz de entregar una respuesta cercana a la deseada. Mientras más precisa es la respuesta entregada por la red, más capacidad de generalización tendrá ésta.

Para que una red neuronal sea capaz de generalizar de buena forma es necesario contar con un conjunto de datos de entrenamiento suficientemente representativo de la globalidad del problema en cuestión.

3. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

- Metodología

La aplicación de Redes Neuronales Artificiales a la predicción de series de tiempo se realiza en esta investigación de acuerdo a las siguientes etapas: Búsqueda de las variables de entrada, preparación del conjunto de datos, creación de la red, entrenamiento, validación y cálculo de los factores de comparación.

3.1 Búsqueda de las variables de entrada

Esta etapa tiene como objetivo identificar los retrasos o rezagos de la serie de tiempo que deben considerarse como variables de entrada en la red neuronal. Para llevar a cabo esta búsqueda se utilizan los siguientes criterios:

- Analizar el comportamiento de la serie de tiempo mediante su representación gráfica o mediante técnicas estadísticas. La idea principal

es lograr identificar los componentes existentes en la serie y de acuerdo a estos determinar las entradas. Si la serie presenta tendencia creciente o decreciente se consideran los periodos $\{x(t), x(t-1)\}$. Si la serie presenta estacionalidad, se consideran los periodos $\{x(t), x(t-k)\}$, donde k es la estacionalidad. Si la serie presenta tendencia y estacionalidad se consideran los periodos $\{x(t), x(t-k+1), x(t-k)\}$.

- Considerar todos los periodos sucesivos correspondientes a un ciclo. Si la serie de tiempo está compuesta de datos mensuales, se consideran por lo general los periodos $\{x(t), x(t-1), \dots, x(t-11)\}$, es decir, se consideran los datos de un año, lo cual es un periodo bastante representativo de tendencias y en especial de las estacionalidad que puedan existir [4].

- Seleccionar aleatoriamente los periodos de la serie de tiempo que serán considerados como entradas [11].

3.2 Preparación del conjunto de datos

Esta etapa tiene como objetivo realizar el escalamiento de los datos. El escalamiento de los datos consiste en la normalización de estos en el intervalo $[0, 1]$ de acuerdo a la siguiente expresión:

$$x(t)_{norm} = \frac{x(t) - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

donde:

$x(t)_{norm}$: es el valor normalizado del periodo t .

$x(t)$: es el valor real del periodo t .

$\min(x)$: es el valor mínimo de la serie.

$\max(x)$: es el valor máximo de la serie.

3.3 Creación de la red

Esta etapa tiene como objetivo determinar cada elemento que compone la arquitectura de la red.

a) Cantidad de nodos de entrada y salida

La cantidad de nodos de entrada está determinada por las entradas que se consideraron en la etapa 3.1.

Se considera un sólo nodo de salida correspondiente al valor de la serie en el siguiente periodo de tiempo.

b) Cantidad de nodos ocultos

Se considera una red con una sola capa oculta. La cantidad de nodos en la capa oculta se determina mediante ensayo y error variando desde $n/2$ hasta $2n$, donde n es el número de nodos de entrada.

c) Función de red

Se utiliza la Función de Base Lineal para todos los nodos pertenecientes a la capa oculta y a la capa de salida.

d) Función de activación

Se considera la función de activación Umbral-Lineal en la capa de entrada, Sigmoide en la capa oculta y Umbral-Lineal en la capa de salida.

e) Interconexión

Las conexiones entre los nodos la red son totalmente conectadas.

f) Dirección de la información

Se considera una red de alimentación hacia adelante, por lo tanto la dirección de la información es desde la capa de entrada hacia la capa oculta y de ésta a la capa de salida.

g) Selección de datos para entrenamiento y validación

La cantidad de datos que se utiliza para el entrenamiento de la red neuronal corresponde al 80% del total de estos. Estos datos deben ser correlativos, siempre desde un periodo anterior a uno posterior, y no elegidos aleatoriamente. La cantidad de datos que se utiliza para la validación de la red corresponde a los datos restantes entre el total de la serie y los seleccionados para entrenamiento, es decir, al 20%.

3.4 Entrenamiento

En esta etapa se define el algoritmo de entrenamiento y los parámetros de configuración propios de éste. Se consideran dos algoritmos de entrenamiento supervisado, que ajustan los pesos sinápticos mediante la minimización del error: Backpropagation y Resilient Propagation.

a) Backpropagation

Los valores asignados a los parámetros de configuración para este algoritmo son los siguientes:

- Número máximo de ciclos: la cantidad máxima de ciclos se determina mediante ensayo y error. Se consideran 1000 y 2000 ciclos de entrenamiento para las series en estudio, dado que se obtienen resultados bastante aceptables, siendo posible aprender la red neuronal y generalizar ante datos desconocidos. Al variar la cantidad de ciclos de entrenamiento no se obtuvieron mejoras considerables, pero si un tiempo de procesamiento considerablemente superior en el caso de aumentar la cantidad de ciclos.

- Error de convergencia: el error de convergencia debe ser lo suficientemente pequeño para considerar que la red aprendió lo suficiente y no necesita seguir el proceso de aprendizaje. Se considera un valor de 0.00001 (1×10^{-5}) para este parámetro.

- Tasa de aprendizaje: este valor se determina mediante ensayo y error. La elección de este parámetro depende de la serie de tiempo que se intenta predecir. Se consideran los siguientes valores: 0.3, 0.6 y 0.9.

- Momento: este valor se determina mediante ensayo y error. La elección de este parámetro depende de la serie de tiempo que se intenta predecir. Se consideran los siguientes valores: 0.0, 0.3, 0.6 y 0.9.

b) Resilient Propagation

Los valores asignados a los parámetros de configuración para este algoritmo son los siguientes:

- Número máximo de ciclos: la cantidad máxima de ciclos se determina mediante ensayo y error. Se consideran 300, 600 y 900 ciclos de entrenamiento.

- Error de convergencia: el error de convergencia debe ser lo suficientemente pequeño para considerar que la red aprendió lo suficiente y no necesita seguir el proceso de aprendizaje. Se considera un valor de 0.00001 (1×10^{-5}) para este parámetro.

3.5 Validación

Esta etapa tiene como objetivo realizar la validación del proceso de aprendizaje de la red. Se presenta a la red el conjunto de datos seleccionados para este fin y se obtienen los valores de la predicción del siguiente periodo para cada patrón de datos.

3.6 Cálculo de los factores de comparación

El objetivo de esta etapa consiste en calcular los factores que serán utilizados en el análisis de los resultados al comparar los distintos modelos de redes neuronales obtenidos y elegir

la más efectiva en la predicción de una serie de tiempo específica. Para llevar a cabo esta tarea se obtienen los siguientes factores:

- Error Absoluto Medio Porcentual (EAMP): se calcula el Error Absoluto Medio Porcentual entre la salida entregada por la red y la salida esperada. Este cálculo se realiza por separado para el conjunto de entrenamiento y para el de validación. El EAMP se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$EAMP = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{s_i - y_i}{y_i}$$

donde:

N: es la cantidad de datos de la serie de tiempo.

si: es la salida i-ésima entregada por la red.

yi: es el valor esperado de la salida i-ésima.

- Coeficiente de correlación (R): se calcula el coeficiente de correlación lineal entre la salida entregada por la red y la salida esperada. El coeficiente de correlación entre estas dos series de tiempo mide su nivel de relación. Mientras más cercano a 1 es el coeficiente, significa que se encuentran más fuertemente relacionadas las series. Este cálculo se realiza por separado para el conjunto de entrenamiento y para el de validación. El coeficiente de correlación se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - y_m) \cdot (s_i - s_m)}{\sqrt{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - y_m)^2\right) \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (s_i - s_m)^2\right)}}$$

donde:

N: es la cantidad de datos de la serie de tiempo.

si: es la salida i-ésima entregada por la red.

sm: es la media de las salidas entregadas por la red.

y_i : es el valor esperado de la salida i -ésima.

y_m : es la media de las salidas esperadas.

- Representación gráfica de las series: se grafican las curvas correspondientes a la serie de tiempo original y la serie de tiempo entregada por la red. Mediante una representación gráfica de ambas series se puede observar la globalidad de los periodos y comprobar que se siguen las mismas tendencias y variaciones.

- Representación gráfica del EAMP: se grafica la curva correspondiente al EAMP entre la serie de tiempo original y la serie de tiempo entregada por la red. Mediante una representación gráfica del EAMP se puede verificar la exactitud de la predicción en distintos periodos de la serie de tiempo.

3.7 Herramientas Utilizadas

- Herramientas Software

Para realizar la investigación propuesta en este trabajo de título, se hace uso de las siguientes herramientas software:

- JOONE 2.0 (Java Object Oriented Neural Engine): framework implementado en Java que permite la creación, el entrenamiento y la validación de Redes Neuronales Artificiales.

- Java JDK 6.0: entorno de desarrollo del lenguaje Java, en el cual se escribe la aplicación utilizada para obtener los resultados de este trabajo de título.

- JFreeChart 1.0.6: librería de gráficos en Java utilizada para representar gráficamente las series de datos esperados y obtenidos por la red, y los gráficos de errores obtenidos.

- Herramientas Hardware

Se utiliza un computador portátil con CPU Pentium IV de 1.7 GHz y con 1 GB en memoria RAM.

3.8 Análisis de los Resultados

- Resultados obtenidos

En esta sección se describen los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en el punto anterior a la predicción de series de tiempo. Como parte de esta investigación, se consideran dos series de tiempo tomadas del campo de la industria: Generación de Electricidad Mensual y Consumo Mensual de Gas Natural.

Se evalúan diferentes redes neuronales de acuerdo a las variables de entradas y algoritmo de aprendizaje utilizados. La búsqueda de las variables de entrada se realiza de acuerdo a los siguientes criterios: comportamiento de la serie y periodos sucesivos correspondientes a un ciclo. Una vez que se determinan las variables de entrada se debe considerar el algoritmo de aprendizaje para la etapa de entrenamiento, utilizándose en primer lugar el algoritmo Backpropagation y luego Resilient Propagation, con las configuraciones de parámetros correspondientes a cada algoritmo.

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos, se intenta buscar una configuración o modelo en el cual se obtenga un Error Absoluto Medio Porcentual (EAMP) lo suficientemente pequeño, tanto para el conjunto de entrenamiento como para el de validación. Además, mediante el coeficiente de correlación (R) se puede comprobar el ajuste que se produce entre los datos entregados por la red y los datos esperados, lo cual es utilizado como un parámetro de verificación de los resultados obtenidos en el EAMP.

a) Serie: Generación de Electricidad Mensual

Esta serie temporal contiene datos sobre la generación mensual de electricidad total en la industria eléctrica de Estados Unidos desde

Enero de 1990 a Julio de 2007. En la Figura 5.1 se puede observar la representación gráfica de esta serie de tiempo, donde los valores se encuentran en millones de kilowatts hora.

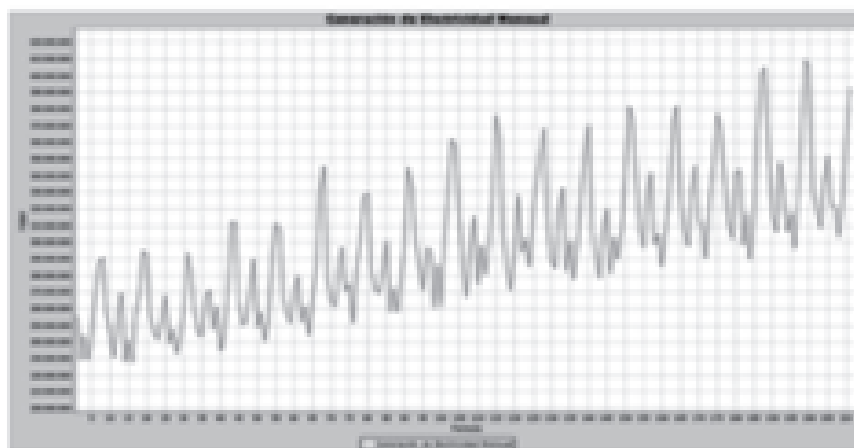


FIGURA 5.1 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL

Se puede observar en la Figura 5.1 que la serie presenta una tendencia creciente y variaciones estacionales bastante definidas.

i) Caso I

Dado que la serie presenta una tendencia creciente, se consideran las siguientes entradas: $\{x(t), x(t-1)\}$

En la Tabla 5.1 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 2000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EANP entrenamiento	EANP validación	R entrenamiento	R validación
0,3	0,0	4	6,941	5,665	0,792	0,763
0,3	0,3	4	7,349	5,578	0,791	0,763
0,3	0,6	4	7,890	5,481	0,788	0,764
0,3	0,9	4	8,437	5,349	0,786	0,747
0,6	0,0	4	7,869	5,473	0,789	0,761
0,6	0,3	4	7,768	5,422	0,786	0,762
0,6	0,6	4	8,096	5,373	0,782	0,764
0,6	0,9	5	8,400	4,553	0,759	0,761
0,9	0,0	4	7,911	5,418	0,785	0,759
0,9	0,3	4	8,308	5,354	0,781	0,761
0,9	0,6	4	8,295	5,379	0,756	0,766
0,9	0,9	4	9,347	5,008	0,782	0,759

TABLA 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO I.

En la Tabla 5.2 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	3	6,245	7,129	0,795	0,751
600	4	6,128	6,927	0,802	0,765
900	2	6,180	7,014	0,799	0,765

TABLA 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO I.

ii) Caso II

Dado que la serie presenta una estacionalidad de 12 periodos se consideran las siguientes entradas: $\{x(t), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.3 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 2000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0,3	0,0	4	2,720	2,546	0,958	0,903
0,3	0,3	3	2,692	2,514	0,959	0,903
0,3	0,6	2	2,670	2,556	0,958	0,902
0,3	0,9	4	4,757	7,687	0,954	0,928
0,6	0,0	2	2,719	2,522	0,958	0,903
0,6	0,3	3	2,704	2,534	0,958	0,901
0,6	0,6	3	2,695	2,564	0,958	0,928
0,6	0,9	1	6,333	7,289	0,949	0,929
0,9	0,0	3	2,744	2,546	0,958	0,902
0,9	0,3	4	2,731	2,579	0,958	0,929
0,9	0,6	4	2,721	2,648	0,958	0,926
0,9	0,9	3	8,789	13,849	0,959	0,911

TABLA 5.3 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO II.

En la Tabla 5.4 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	4	2,700	2,649	0,958	0,928
600	3	2,705	2,618	0,958	0,930
900	4	2,635	2,715	0,961	0,931

TABLA 5.4 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO II.

iii) Caso III

Si se considera que además de la tendencia creciente presente en la serie existe una estacionalidad de 12 periodos, se consideran las siguientes entradas: $\{x(t), x(t-10), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.5 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 2000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0,3	0,0	3	2,747	2,739	0,961	0,935
0,3	0,3	2	2,771	2,763	0,961	0,935
0,3	0,6	2	2,731	2,877	0,960	0,934
0,3	0,9	6	3,021	4,621	0,958	0,930
0,6	0,0	3	2,797	2,788	0,961	0,935
0,6	0,3	3	2,817	2,768	0,961	0,935
0,6	0,6	3	2,835	2,770	0,961	0,935
0,6	0,9	2	2,950	2,586	0,950	0,918
0,9	0,0	2	2,890	2,686	0,960	0,935
0,9	0,3	5	2,814	2,745	0,962	0,934
0,9	0,6	5	2,734	2,917	0,961	0,932
0,9	0,9	3	4,476	6,718	0,905	0,837

TABLA 5.5 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO III.

En la Tabla 5.6 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	5	2,724	2,675	0,959	0,933
600	6	2,696	2,663	0,960	0,934
900	3	2,607	2,822	0,963	0,934

TABLA 5.6 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO III.

iv) Caso IV

Dado que esta serie es mensual, es una práctica común utilizar como entradas los periodos correspondientes al último año, de esta forma se consideran las siguientes entradas: $\{x(t), x(t-1), x(t-2), x(t-3), x(t-4), x(t-5), x(t-6), x(t-7), x(t-8), x(t-9), x(t-10), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.7 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 2000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0.1	0.0	8	2,445	2,777	0,971	0,960
0.1	0.1	16	2,320	2,542	0,974	0,950
0.1	0.6	6	2,299	2,243	0,975	0,950
0.1	0.9	19	2,021	2,546	0,979	0,960
0.6	0.0	11	2,369	2,542	0,975	0,952
0.6	0.1	24	2,117	2,728	0,974	0,952
0.6	0.6	9	2,039	4,073	0,980	0,857
0.6	0.9	23	2,003	4,128	0,980	0,859
0.9	0.0	21	2,037	2,836	0,981	0,957
0.9	0.1	20	2,452	2,728	0,960	0,957
0.9	0.6	21	2,752	2,819	0,949	0,953
0.9	0.9	17	2,261	12,691	0,977	0,966

TABLA 5.7 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO IV.

En la Tabla 5.8 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	22	2,242	2,563	0,973	0,947
600	18	2,059	2,775	0,977	0,942
900	19	1,719	2,888	0,983	0,949

TABLA 5.8 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL EN CASO IV.

v) Análisis

Al analizar los resultados obtenidos en el Caso I se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation, los resultados son similares al variar la tasa de aprendizaje y el momento, no obteniéndose ventajas significativas con alguna variación de estos parámetros de configuración. De la misma forma, al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation se observa que los resultados no varían de acuerdo a la selección de la cantidad de ciclos de entrenamiento y de la cantidad de nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se puede decir que son bastante similares, obteniéndose mejores resultados en la etapa de predicción con Backpropagation y en la etapa de validación con Resilient Propagation.

En los resultados obtenidos en el Caso II se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation, los resultados no varían de acuerdo a la selección de la tasa de aprendizaje y del momento, salvo los casos en los que el momento toma un valor de 0,9. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation, se observa que los resultados no

varían de acuerdo a la selección de la cantidad de ciclos de entrenamiento y nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se observa que son bastante similares, obteniéndose mejores resultados en la etapa de predicción con Backpropagation y un mejor ajuste en la etapa de validación con Resilient Propagation, al igual que en el Caso I.

En los resultados obtenidos en el Caso III se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation los resultados son similares al variar la tasa de aprendizaje y el momento, salvo en los casos en los que el momento toma un valor de 0,9 al igual como ocurre en el Caso II. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation, se observa que los resultados no varían significativamente tanto al variar la cantidad de ciclos de entrenamiento como también la cantidad de nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se puede decir que son bastante similares obteniéndose mejores resultados tanto en la etapa de predicción como en la validación con Resilient Propagation.

Al analizar los resultados obtenidos en el Caso IV, se observa que utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation los resultados son

bastante similares al variar la tasa de aprendizaje y el momento, obteniéndose los peores resultados al utilizar una tasa de aprendizaje mayor o igual a 0,6 y un momento mayor o igual a 0,6. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation, se observa que los resultados no varían de acuerdo a la selección de la cantidad de ciclos de entrenamiento y de nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se puede decir que se obtienen mejores resultados tanto en la etapa de predicción como en la validación con Resilient Propagation, al igual que en el Caso III.

Al comparar todos los resultados presentados en esta sección, se concluye que los mejores resultados se obtienen en el Caso II, Caso III y Caso IV, siendo estos bastante similares. Este fenómeno puede explicarse dada la tendencia

creciente y la estacionalidad presente en la serie de tiempo en estudio. Los mejores resultados se obtienen en el Caso IV, donde se consideran las entradas sucesivas correspondientes a un año, lo cual da una visión bastante amplia de las tendencias y estacionalidades presentes. El tiempo de procesamiento, dada la cantidad de conexiones existentes en las redes correspondientes al Caso IV, es bastante mayor al obtenido en las redes del Caso II y Caso III.

En la Figura 5.2 se representan gráficamente la serie real que corresponde a los datos esperados y la serie predicción que corresponde a la entregada por la red, utilizando la siguiente configuración en la cual se obtuvieron los mejores resultados:

- Variables de entrada: $\{x(t), x(t-1), \dots, x(t-11)\}$
- Algoritmo de aprendizaje: Resilient Propagation
- Ciclos de entrenamiento: 900
- Nodos capa oculta: 19

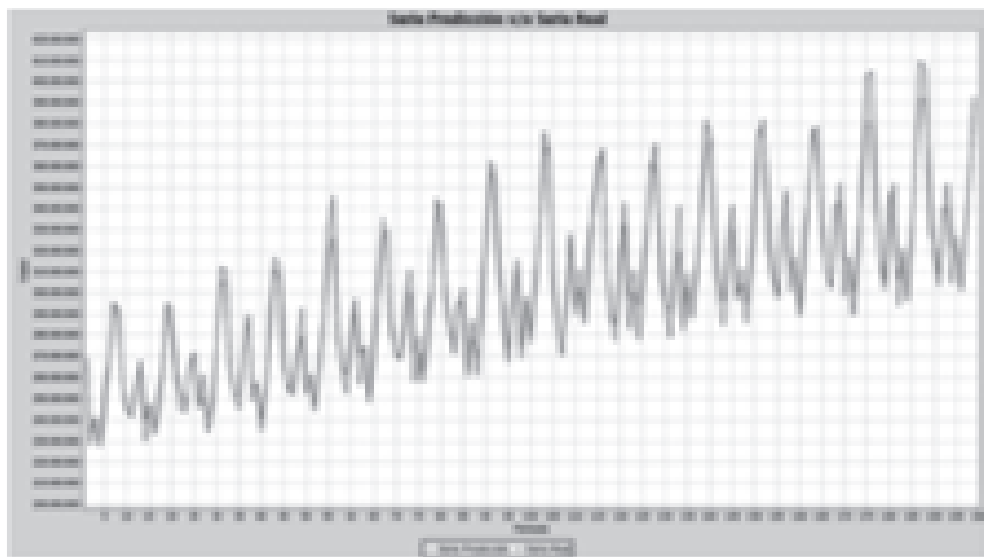


FIGURA 5.2 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL. SERIE REAL VERSUS SERIE PREDICCIÓN.

Se observa en la Figura 5.2 que el ajuste entre las dos series es bastante bueno, lo cual es respaldado por el EAMP de 1,719% en el entrenamiento y de 2,888% en la validación, y el coeficiente de correlación R de 0,983 en el entrenamiento y de 0,949 en la validación, obteniendo una correlación prácticamente perfecta en el conjunto de entrenamiento y muy cercana a 1 en el conjunto de validación.

En la Figura 5.3 se representan gráficamente el EAMP entre los datos esperados y los entregados por la red para la configuración de red actual.

En la Figura 5.3 se puede observar que el EAMP permanece oscilando entre 0% y 6% durante toda la serie de tiempo, no superando el 8% de error en su punto máximo.

Al disminuir la cantidad de datos asignados a entrenamiento desde un 80% a un 60% y utilizando un 40% de los datos para la validación, se obtiene un EAMP de entrenamiento del 1,929% y en validación se obtiene un 2,746%. El coeficiente de correlación R obtenido en entrenamiento es 0,977 y en validación se obtiene 0,940. Estos resultados indican la capacidad que tiene la configuración de red neuronal elegida para aprender desde un conjunto de datos menor (60%) y mantener el EAMP de validación, obtenido con el 20% de los datos, considerando que se utiliza un conjunto de datos mayor (40%), donde es más probable encontrar patrones diferentes de los aprendidos.

Al agregar una distorsión aleatoria entre [-5%, +5%] a cada uno de los datos del conjunto de validación, se obtiene un EAMP de 3,459% y un coeficiente de correlación igual a 0,917 para el conjunto de datos mencionados. Esto indica que una vez aprendidos los patrones correspondientes al conjunto de datos de aprendizaje, la configuración de red escogida es capaz de generalizar en la predicción y ser tolerante a pequeñas distorsiones existentes en

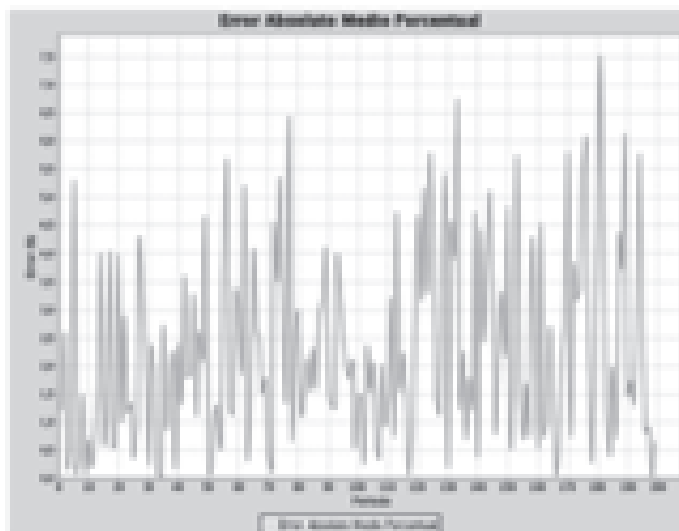


FIGURA 5.3 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MENSUAL. RRROR ABSOLUTO MEDIO PORCENTUAL.

los datos, manteniéndose buenos resultados no superando en un 1% la diferencia entre el EAMP para el conjunto de validación con distorsión y el conjunto de datos sin distorsión.

b) Serie: Consumo Mensual de Gas Natural

Esta serie temporal contiene datos sobre el consumo mensual de gas natural en Estados Unidos desde Enero de 2001 a Agosto de 2007. En la Figura 5.4 se puede observar la representación gráfica de esta serie de tiempo, donde los valores se encuentran en billones de pies cúbicos. Se puede observar en la Figura 5.4 que la serie

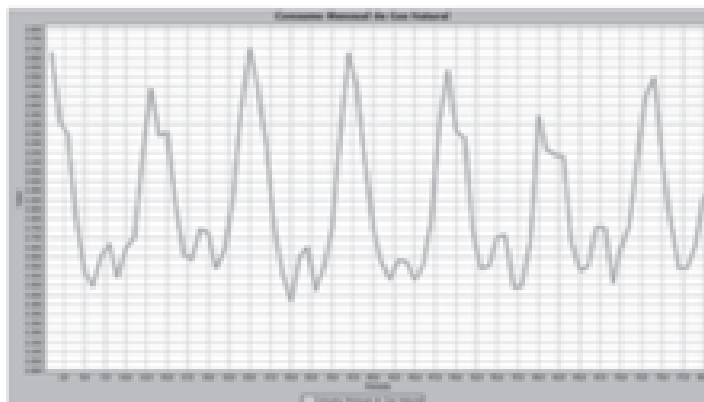


FIGURA 5.4 CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL.

no presenta una tendencia clara, pero sí variaciones estacionales bastante definidas en el periodo de un año, presentándose un alto consumo en el invierno y un consumo más bajo en verano justificado principalmente por la temperatura.

i) Caso 1

Dado que existe una estacionalidad de 12 periodos, se consideran las siguientes entradas: $\{x(t), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.9 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 1000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0,1	0,0	1	4,737	6,652	0,951	0,888
0,1	0,1	4	4,919	7,897	0,949	0,878
0,1	0,6	1	5,754	8,837	0,948	0,877
0,1	0,9	2	5,884	7,232	0,923	0,877
0,6	0,0	1	5,895	7,332	0,949	0,877
0,6	0,1	1	5,513	7,844	0,947	0,868
0,6	0,6	4	5,822	8,118	0,942	0,833
0,6	0,9	4	24,166	24,888	0,822	0,771
0,9	0,0	1	5,324	7,833	0,947	0,866
0,9	0,1	1	5,619	8,833	0,944	0,852
0,9	0,6	2	5,818	8,342	0,935	0,824
0,9	0,9	4	24,168	24,881	0,833	0,796

TABLA 5.9 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO 1

En la Tabla 5.10 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	3	4,669	6,225	0,951	0,891
600	4	4,499	5,810	0,956	0,899
900	4	4,539	5,931	0,954	0,895

TABLA 5.10 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO 1

ii) Caso II

Además de la estacionalidad anual considerada en el Caso I se considera el periodo anterior al año, de manera de presentar a la red más antecedentes sobre ésta, por lo tanto las entradas son: $\{x(t), x(t-10), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.11 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 1000 ciclos.

Tabla 5.11: Resultados obtenidos con Backpropagation en serie Consumo Mensual de Gas Natural en Caso II

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0,3	0,0	11	4,672	6,113	0,956	0,916
0,3	0,3	11	4,883	6,394	0,956	0,916
0,3	0,6	11	5,759	7,243	0,955	0,919
0,3	0,9	6	4,767	6,673	0,945	0,864
0,6	0,0	11	5,809	6,658	0,955	0,907
0,6	0,3	11	5,816	7,166	0,954	0,900
0,6	0,6	6	6,854	7,992	0,949	0,855
0,6	0,9	11	24,159	24,472	-0,689	-0,641
0,9	0,0	11	5,213	7,129	0,952	0,892
0,9	0,3	11	5,488	7,333	0,949	0,876
0,9	0,6	6	5,531	8,091	0,945	0,829
0,9	0,9	11	24,346	24,479	0,487	0,497

TABLA 5.11 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO II

En la Tabla 5.12 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	2	4,422	5,389	0,957	0,922
600	4	3,971	4,636	0,964	0,950
900	4	3,951	4,447	0,964	0,947

TABLA 5.12 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO II.

iii) Caso III

Además de la estacionalidad anual que se consideró en el Caso I se considerarán los periodos 6 y 9 dentro de cada año, por lo tanto las entradas son: $\{x(t), x(t-5), x(t-8), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.13 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 2000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0,3	0,0	3	4,831	6,135	0,956	0,908
0,3	0,3	2	4,723	5,886	0,958	0,881
0,3	0,6	8	4,837	6,068	0,957	0,893
0,3	0,9	4	5,009	6,666	0,923	0,885
0,6	0,0	7	4,598	6,510	0,960	0,974
0,6	0,3	5	4,540	5,708	0,955	0,901
0,6	0,6	6	5,454	5,822	0,977	0,913
0,6	0,9	6	24,364	24,477	-0,672	-0,655
0,9	0,0	7	4,327	6,162	0,958	0,885
0,9	0,3	8	4,331	6,264	0,961	0,882
0,9	0,6	8	5,460	5,945	0,951	0,889
0,9	0,9	2	24,366	24,479	-0,398	-0,310

TABLA 5.13 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO III.

En la Tabla 5.14 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	7	3,673	4,786	0,968	0,921
600	5	3,658	5,270	0,965	0,913
900	7	3,477	4,666	0,971	0,923

TABLA 5.14 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO III.

iv) Caso IV

Dado que esta serie es mensual es una práctica común utilizar como entradas los periodos correspondientes al último año, de esta forma se consideran las siguientes entradas: $\{x(t), x(t-1), x(t-2), x(t-3), x(t-4), x(t-5), x(t-6), x(t-7), x(t-8), x(t-9), x(t-10), x(t-11)\}$

En la Tabla 5.15 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Backpropagation para el entrenamiento utilizando 2000 ciclos.

Tasa aprendizaje	Momento	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
0,3	0,0	16	4,868	6,723	0,967	0,882
0,3	0,3	8	4,993	6,787	0,973	0,868
0,3	0,6	6	4,496	3,427	0,969	0,909
0,3	0,9	23	2,362	7,683	0,993	0,836
0,6	0,0	13	4,883	6,261	0,977	0,882
0,6	0,3	17	3,719	6,527	0,984	0,875
0,6	0,6	17	2,856	8,360	0,994	0,898
0,6	0,9	20	24,896	24,379	-0,165	-0,018
0,9	0,0	16	4,284	6,977	0,983	0,868
0,9	0,3	8	4,669	8,866	0,982	0,839
0,9	0,6	13	4,783	8,910	0,977	0,875
0,9	0,9	13	24,363	24,476	0,943	-0,063

TABLA 5.15 RESULTADOS OBTENIDOS CON BACKPROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO IV.

En la Tabla 5.16 se muestran las redes neuronales con mejores resultados obtenidas al utilizar el algoritmo Resilient Propagation para el entrenamiento.

Ciclos	Nodos capa oculta	EAMP entrenamiento	EAMP validación	R entrenamiento	R validación
300	6	3,113	5,102	0,973	0,920
600	23	1,515	5,593	0,994	0,906
900	20	1,471	5,823	0,995	0,898

TABLA 5.16 RESULTADOS OBTENIDOS CON RESILIENT PROPAGATION EN SERIE CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL EN CASO IV.

v) *Análisis*

Al analizar los resultados obtenidos en el Caso I se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation, los resultados en el entrenamiento son similares al variar la tasa de aprendizaje y el momento, salvo los casos en que existe una tasa de aprendizaje mayor o igual a 0,6 y un momento mayor o igual a 0,9 en los que la red no es capaz de aprender el comportamiento de la serie. En el conjunto de validación existe una variación significativa de los resultados de acuerdo a la selección de la tasa de aprendizaje y momento. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados del conjunto de entrenamiento ni del de validación. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation se observa que los resultados son muy similares, tanto al variar la cantidad de ciclos de entrenamiento como la cantidad de nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como Resilient Propagation, se puede decir que los mejores resultados tanto en entrenamiento como en validación son obtenidos al utilizar Resilient Propagation.

En los resultados obtenidos en el Caso II se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation, los resultados en el entrenamiento son similares al variar la tasa de aprendizaje y el momento, salvo los casos en que existe una tasa de aprendizaje mayor o igual a 0,6 y un momento mayor o igual a 0,9 en los que la red no es capaz de aprender el comportamiento de la serie al igual que en el Caso I. En el conjunto de validación existe una variación significativa de los resultados de acuerdo a la selección de la tasa de aprendizaje y momento. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados del conjunto de entrenamiento ni del de validación. Al utilizar el algoritmo de

aprendizaje Resilient Propagation, se observa que los resultados no varían significativamente de acuerdo a la selección de la cantidad de ciclos de entrenamiento y nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se puede decir que los mejores resultados tanto en entrenamiento como en validación son obtenidos al utilizar Resilient Propagation.

En los resultados obtenidos en el Caso III se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation, los resultados en el entrenamiento son similares al variar la tasa de aprendizaje y el momento, salvo en los casos en que existe una tasa de aprendizaje mayor o igual a 0,6 y un momento mayor o igual a 0,9 en los que la red no es capaz de aprender el comportamiento de la serie. En el conjunto de validación existe una pequeña variación de los resultados de acuerdo a la selección de la tasa de aprendizaje y momento que no resulta significativa. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados del conjunto de entrenamiento ni del de validación. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation, se observa que los resultados no varían significativamente de acuerdo a la selección de la cantidad de ciclos de entrenamiento y nodos ocultos. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se puede decir que los mejores resultados tanto en entrenamiento como en validación son obtenidos al utilizar Resilient Propagation.

En los resultados obtenidos en el Caso IV se observa que, utilizando el algoritmo de aprendizaje Backpropagation, los resultados en el entrenamiento varían de acuerdo a la selección de la tasa de aprendizaje y momento, y en particular en los casos en que existe una

tasa de aprendizaje mayor o igual a 0,6 y un momento mayor o igual a 0,9 en los que la red no es capaz de aprender el comportamiento de la serie. En el conjunto de validación existe una variación significativa de los resultados de acuerdo a la selección de la tasa de aprendizaje y momento. Al variar la cantidad de nodos ocultos no se obtienen mejoras considerables en los resultados del conjunto de entrenamiento ni del de validación. Al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation, se observa que los resultados varían significativamente de acuerdo a la selección de la cantidad de ciclos de entrenamiento y nodos ocultos, principalmente en la etapa de entrenamiento. Al comparar los resultados utilizando tanto el algoritmo Backpropagation como también Resilient Propagation, se puede decir que los mejores resultados tanto en entrenamiento como en validación son obtenidos al utilizar Resilient Propagation.

Dado los resultados obtenidos en cada caso, se observa que al utilizar el algoritmo de aprendizaje Resilient Propagation se obtuvieron los mejores resultados en cada caso, siendo

bastante eficiente dado que necesita menos ciclos de entrenamiento lo que se traduce en un menor tiempo de procesamiento.

Al comparar todos los resultados presentados en esta sección, se concluye que los mejores resultados se obtienen en el Caso II y Caso III, utilizando el algoritmo Resilient Propagation en ambos casos, siendo estos bastante similares. Los mejores resultados se obtienen en el Caso II, donde se consideran las entradas correspondientes al periodo actual, el rezago previo a un año y el rezago correspondiente a un año. En la Figura 5.5 se representan gráficamente la serie real, que corresponde a los datos esperados, y la serie predicción, que corresponde a la entregada por la red, utilizando la siguiente configuración en la cual se obtuvieron los mejores resultados:

- Variables de entrada: $\{x(t), x(t-10), x(t-11)\}$
- Algoritmo de aprendizaje: Resilient Propagation
- Ciclos de entrenamiento: 900
- Nodos capa oculta: 4

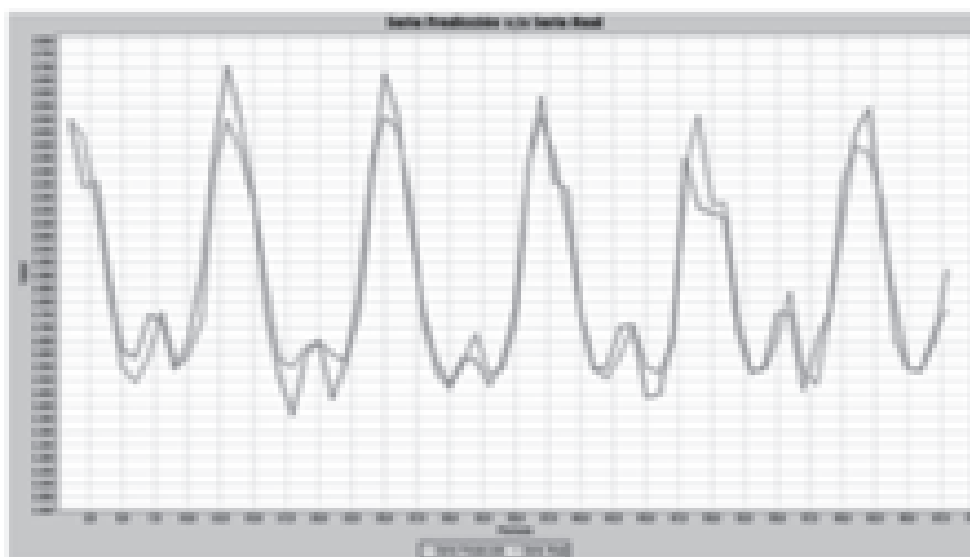


FIGURA 5.5 CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL. SERIE REAL VERSUS SERIE PREDICCIÓN.

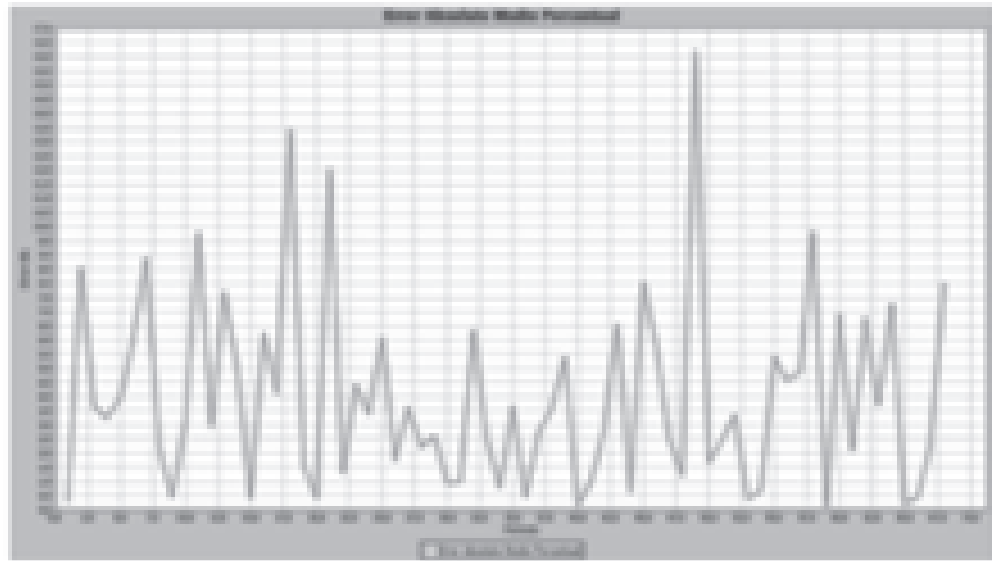


FIGURA 5.6 CONSUMO MENSUAL DE GAS NATURAL. ERROR ABSOLUTO MEDIO PORCENTUAL.

En la Figura 5.6 se puede observar que el EAMP permanece oscilando principalmente entre 0% y 10% durante toda la serie de tiempo y alcanza su punto máximo no superando en el 17% de error.

Al disminuir la cantidad de datos asignados a entrenamiento desde un 80% a un 60%, y utilizando un 40% de los datos para la validación, se obtiene un EAMP de entrenamiento del 3,512%, y en validación se obtiene un 5,439%. El coeficiente de correlación R obtenido en entrenamiento es 0,977, y en validación se obtiene 0,911. Estos resultados indican la capacidad que tiene la configuración de red neuronal elegida para aprender desde un conjunto de datos menor (60%) y aumentar el EAMP de validación tan sólo en un 1%, considerando que, dados los pocos datos de esta serie, un 20% de datos en la etapa de entrenamiento resulta muy significativo, siendo muy probable encontrar patrones diferentes de los aprendidos.

Al agregar una distorsión aleatoria entre [-5%, +5%] a cada uno de los datos del conjunto de

validación, se obtiene un EAMP de 6,023% y un coeficiente de correlación igual a 0,905 para el conjunto de datos mencionados. Esto indica que una vez aprendidos los patrones correspondientes al conjunto de datos de aprendizaje, la configuración de red escogida es capaz de generalizar en la predicción y ser tolerante a pequeñas distorsiones existentes en los datos, obteniéndose una diferencia entre el EAMP en el conjunto de datos de validación con distorsión y el conjunto de datos sin distorsión inferior al 2%.

Trabajos Futuros

Con el objetivo de obtener mejores resultados en la predicción de series de tiempo mediante Redes Neuronales, se mencionan algunas técnicas que pueden ser útiles en la optimización de los modelos neuronales enfocándose en la determinación de los componentes de la arquitectura de red.

a) Búsqueda de las variables de entrada

Para apoyar el proceso de búsqueda de las variables de entrada de la red puede ser útil hacer uso de algunas técnicas del campo estadístico como: coeficientes de autocorrelación y análisis de componentes principales.

Los coeficientes de autocorrelación son una herramienta estadística que sugiere cuáles son los rezagos o retardos de la serie de tiempo que tienen mayor relevancia sobre los demás rezagos. De esta forma se consideran como entradas los rezagos de la serie que tienen los valores más significativos, eliminando las variables no significativas, reduciéndose las conexiones existentes en la red y el tiempo de procesamiento utilizado en la etapa de entrenamiento.

El Análisis de Componentes Principales es una técnica que permite disminuir la cantidad de variables de entrada, seleccionando solamente la información esencial de cada variable de entrada a la red.

c) Selección de la arquitectura de red

Se puede hacer uso de otro modelo de red neuronal para la predicción de series de tiempo, como las Redes Recurrentes de Elman o Redes Función de Base Radial.

4. CONCLUSIÓN

En esta investigación se han utilizado las redes neuronales artificiales en la predicción de dos series de tiempo tomadas del campo de la industria: Generación de Electricidad Mensual y Consumo Mensual de Gas Natural.

Como parte del objetivo general de esta investigación se ha evaluado la capacidad que tienen las redes neuronales artificiales en la

predicción de series de tiempo, resultando efectivas en esta tarea y demostrando que constituyen una herramienta útil en la predicción de series de tiempo.

Uno de los principales inconvenientes en la utilización de redes neuronales es la elección de cada elemento de la arquitectura de red, obteniéndose en muchos casos por ensayo y error dentro de un conjunto acotado de posibles valores. En este trabajo de título se evalúan algunas sugerencias establecidas en la literatura para seleccionar estos elementos basado principalmente en el análisis de cada serie de tiempo, obteniéndose buenos resultados.

En la serie Generación de Electricidad Mensual, los resultados que se obtienen son bastante satisfactorios, dado que el Error Absoluto Medio Porcentual al evaluar la mejor configuración de red neuronal es inferior al 3%, existiendo una correlación entre la serie de datos entregados por la red y los esperados de 0,949. Al variar la cantidad de datos utilizados en el entrenamiento desde un 80% a un 60%, los resultados obtenidos no se ven afectados, siendo posible generalizar en un conjunto de datos donde existe mayor probabilidad de encontrar patrones desconocidos. Este comportamiento puede justificarse dada la tendencia y estacionalidad bastante definida de esta serie de tiempo y la suficiente cantidad de patrones con los que se cuenta. Al aplicar una distorsión aleatoria entre [-5%, +5%] a los datos de validación, se produce un aumento del Error Absoluto Medio Porcentual de menos del 1%, lo cual demuestra la capacidad que tienen las redes neuronales de tolerar ruido en los datos.

En la serie Consumo Mensual de Gas Natural se obtiene un Error Absoluto Medio Porcentual bastante pequeño al evaluar la mejor configuración de red neuronal, obteniéndose un 4,447% y un coeficiente de correlación entre

la serie de datos entregados por la red y los esperados de 0,947. Al variar la cantidad de datos utilizados en el entrenamiento desde un 80% a un 60%, se obtiene un aumento en el Error Absoluto Medio Porcentual del 1%, lo que puede justificarse dada la baja cantidad de datos utilizados para entrenamiento.

Al aplicar una distorsión aleatoria entre [-5%, +5%] a los datos de validación, se produce un aumento del Error Absoluto Medio Porcentual cercano al 2%, lo que pone en evidencia la capacidad que tienen las redes neuronales de tolerar ruido en los datos.

Al evaluar los resultados obtenidos con cada configuración en ambas series, se puede observar que el algoritmo Resilient Propagation presenta una gran ventaja sobre Backpropagation, obteniéndose mejores resultados y un tiempo de procesamiento bastante menor en la mayoría de los casos de estudio.

REFERENCIAS

- [1] **Zhang, Peter**: “Neural Networks in Business Forecasting”, 1ª edición, Idea Group Publishing, E.U.A. 2004.
- [2] **Freeman, James y Skapura, David**: “Redes Neuronales Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación”, 1ª edición, Addison-Wesley Iberoamericana, E.U.A 1993.
- [3] **Kasabov, Nikola**: “Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering”, 1ª edición, The MIT Press, E.U.A. 1996.
- [4] **Rabunal, Juan y Dorado, Julian**: “Artificial Neural Networks in Real-Life Applications”, 1ª edición, Idea Group Publishing, E.U.A. 2006.
- [5] **McNelis, Paul**: “Neural Networks in Finance: Gaining Predictive Edge in the Market”, 1ª edición, Elsevier Academic Press, E.U.A. 2005.
- [6] **Rojas, Raúl**: “Neural Networks. A Systematic Introduction”, 1ª edición, Springer, E.U.A. 1996.
- [7] **Gujarati, Damodar**: “Econometría”, 1ª edición, Mc Graw-Hill, México 2004.
- [8] **Faraway, Julian y Chatfield, Chris**: “Time series forecasting with neural networks: a comparative study using the airline data”, Applied Statistic, Volumen 47, pp. 231-250, 1998.
- [9] **Kaastra, Ieabeling y Boyd, Milton**: “Designing a neural network for forecasting financial and economic time series”, Neurocomputing, Volumen 10, pp. 215-236, 1996.
- [10] **Shlens, Jonathon**: “Time Series Prediction with Artificial Neural Networks”, 1999.
- [11] **Collantes, Joanna**: “Predicción con Redes Neuronales: Comparación con las Metodologías de Box y Jenkins”, Universidad de los Andes, Venezuela 2001.
- [12] **Requena, Ignacio**: “Introducción a las Redes Neuronales Artificiales. Neurocomputación”, Universidad de Granada, España.
- [13] **Correa, Rafael**: “Redes Neuronales Artificiales en Ingeniería y Física Nuclear. Caracterización de espectros PIXE”, Universidad de Granada, España 2006.

Ricardo Corbinaud Pérez.

ricardo.corbinaud@utem.cl

Patricia Mellado Acevedo.

pmellado@utem.cl

Marta Rojas Estay

marta.rojas@utem.cl

UNA EXPERIENCIA DE VINCULACIÓN CON EL MEDIO A TRAVÉS DE "APRENDIZAJE Y SERVICIO" EN LAS CARRERAS DE: INGENIERÍA CIVIL EN COMPUTACIÓN MENCIÓN INFORMÁTICA E INGENIERÍA EN INFORMÁTICA DE LA UTEM

RESUMEN

Este trabajo aborda la vinculación con el medio a través de una experiencia pedagógica denominada de "Aprendizaje y Servicio", incorporada en el modelo educativo de la UTEM en establecimientos vulnerables administrados por municipios en la región metropolitana.

Palabras clave: **Aprendizaje y Servicio, Vinculación con el medio, RSU.**

INTRODUCCIÓN

La transferencia de conocimientos y prestación de servicios en función de los requerimientos de los actores económicos y sociales, así como la vinculación ligada al desarrollo relativo de la institución y al nivel de excelencia de sus investigadores y especialistas, están mediadas por la adecuación entre el conocimiento acumulado y el capital humano disponible. Esto permitirá a la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) ejecutar uno de los tres ejes de su plan estratégico (Plan Estratégico UTEM, 2011-2015), que es la responsabilidad social, en la que alumnos y profesores deben involucrarse en un quehacer social que permita a nuestros estudiantes tener un sello que los identifique en el campo laboral. Así se construirá conocimiento compartido (espacio de conexión entre demandas y ofertas de conocimiento del entorno y de la universidad)

con un perfil orientado a las necesidades del entorno y al desarrollo humano.

Por lo anterior, este trabajo expone los resultados de un conjunto de proyectos multidisciplinarios en el ámbito tecnológico, productivo o profesional, con el fin de mejorar el vínculo de estudiantes y profesores con la responsabilidad social, para cumplir con uno de los pilares fundamentales del plan estratégico de la UTEM y del Departamento de Informática y Computación de la Facultad de Ingeniería.

1. DESARROLLO DEL TEMA

Operacionalización de los proyectos

La Vicerrectoría de Transferencia Tecnológica y Extensión de la UTEM desarrolla su política de vinculación con el medio a través de Programas de Responsabilidad Social en conjunto con distintas entidades, tales como la Junta Nacional de Jardines Infantiles, en cuyo marco se desarrollan materiales didácticos para jardines con población indígena. Además, con el Servicio Nacional de la Mujer, en cuyo marco se desarrolla la plataforma web del Programa de Apoyo al Emprendimiento de Mujeres Jefas de Hogar, como, asimismo, la imagen corporativa de diez microempresarias de la comuna de Colina.

Estos programas se enmarcan en convenios de Cooperación, los que constituyen un instrumento eficaz para desarrollar programas de colaboración entre la UTEM y los Municipios. Esto genera una agenda común, de mediano y largo plazo, permitiendo el desarrollo de un programa que garantice un impacto en la comunidad con el proceso de enseñanza-aprendizaje de los estudiantes de establecimientos vulnerables de la comuna.

Objetivos generales de los proyectos

- Consolidar características diferenciadoras y elegibles para posicionar a la UTEM, en la Impronta Tecnológica, la Responsabilidad Social Universitaria (RSU) y la Sustentabilidad Medioambiental de sus campus, entre otras.
- Fortalecer los vínculos con organismos del sector público y privado que potencien la docencia de pregrado e investigación.

Descripción de los Proyectos realizados

1.- Mejoramiento de la red Inalámbrica de los Colegios y consultorios de la Corporación Municipal de la Comuna de San Miguel y Recoleta.

Este proyecto es realizado por los estudiantes de la asignatura Comunicación de Datos de la carrera de Ingeniería Civil en Computación, mención Informática e Ingeniería en Informática, guiados y coordinados por los profesores del Departamento de Informática y Computación, de la Facultad de Ingeniería de la UTEM. El objetivo es configurar una red para conectar un dispositivo móvil y/o portátil de manera inalámbrica desde cualquier zona del colegio, y alternativamente conectar algunos equipos de escritorio, de las oficinas, mediante la red cableada, para que todos los usuarios del colegio tengan acceso a Internet.

Objetivos del proyecto

- Desarrollar el levantamiento de los requerimientos en los distintos establecimientos involucrados en el proyecto, por parte de los estudiantes de la asignatura de Comunicación de Datos de la Escuela de Informática de la Facultad de Ingeniería de la UTEM.
- Crear, por parte de los estudiantes de la asignatura de Comunicación de Datos de la Escuela

de Informática de la Facultad de Ingeniería de la UTEM, un informe técnico para la instalación de las redes inalámbricas de los distintos establecimientos involucrados en el proyecto.

- Implementar, por parte de los estudiantes de la asignatura de Comunicación de Datos de la Escuela de Informática de la Facultad de Ingeniería de la UTEM, una red inalámbrica en los distintos establecimientos involucrados en el proyecto.

En una primera fase, se presenta el estado actual de iluminación inalámbrica de cada colegio, así como los requerimientos necesarios para mejorar el sistema de comunicación existente, con las posibles soluciones de cada caso y sus costos asociados. En una segunda fase, se realiza la implementación del sistema wi-fi, dando cobertura inalámbrica a todo el espacio físico perteneciente a los colegios, como son los patios, las salas, los laboratorios, los gimnasios y los comedores. Las soluciones técnicas sugeridas

asociadas al presupuesto presentado permiten la implementación de las mejoras esperadas. En cada caso, se instalan equipos que permiten las conexiones inalámbricas y cableadas, verificándose su conectividad y alcance, de manera que el costo de los elementos físicos involucrados en el proyecto es pecunio de los responsables de los establecimientos, mientras que la mano de obra física e intelectual va a cargo de los estudiantes. El trabajo es evaluado por los beneficiarios de los establecimientos y, luego, por el profesor de la asignatura más afín a éste. Así se logra un aprendizaje efectivo a través del concepto de "Aprendizaje y Servicio", tal como lo establece el modelo educativo de la UTEM.

Beneficiarios

Los beneficiarios directos del proyecto son los estudiantes y profesores de los establecimientos escolares administrados por la corporación municipal de San Miguel, como lo muestra la tabla 1.

ESTABLECIMIENTO	Total	Total
	Cursos	Matrícula
Villa San Miguel	10	347
Santa Fe	10	252
Pablo Neruda	10	338
Territorio Antártico	12	433
Llano Subercaseaux	12	415
Lic. Betsabé Hormazábal	13	461
Lic. Andrés Bello	17	756
Los Cedros del Líbano	16	156
Hugo Morales Bizama	8	226
Instituto Regional Adulto	7	244
Directivos Profesores para Docente		285
Totales	105	3913

TABLA 1. ESTABLECIMIENTOS DONDE SE IMPLEMENTAN LOS PROYECTOS WIFI EN LA COMUNA DE SAN MIGUEL (FUENTE: PADEM 2014).

Los beneficiarios más vulnerables de la comuna de San Miguel se ven reflejados en la tabla 2:

REF: MES DE MARZO	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Escuela gabriela mistral	24	52	75			
Escuela villa san miguel	35	77	86	156	174	207
Escuela santa fe	112	122	161	153	171	189
Escuela pablo neruda	45	57	132	154	164	206
Escuela territorio antartico	82	170	154	150	210	208
Escuela llano subercaseaux	66	122	127	171	154	182
Liceo luis galecio corvera	39	79		6		0
Liceo betsabe hormazabal					20	121
Liceo andrés bello					45	44
Totales	403	679	660	790	941	1157

TABLA 2. ALUMNOS VULNERABLES DISTRIBUIDOS POR AÑO

2. ALFABETIZACIÓN DIGITAL

Descripción General del Proyecto

Chile presenta muchos indicadores relevantes de uso de plataformas tecnológicas, tales como el uso de celulares y facebook, principalmente en el grupo etario vinculado con las generaciones más jóvenes. Sin embargo, esto no necesariamente implica que tales tecnologías sean usadas por los jóvenes de manera eficiente en el ámbito educativo. De ahí el interés de optimizar su potencial en esta área.

Al interior del sistema educacional, el uso de las tecnologías se ha masificado en algunas áreas de la gestión escolar, tales como los sistemas de registro de notas. Asimismo, en distintas páginas web que apoyan el proceso de enseñanza-aprendizaje, hay acceso para los padres de modo que estos puedan apoyar a sus hijos en este proceso.

Sin embargo, son justamente los padres de los estudiantes de establecimientos vulnerables

los que tendrían más dificultades con el manejo de las nuevas tecnologías. Aunque en muchos hogares existen computadores, su uso se restringe principalmente a jóvenes y niños. Si bien existe el consenso de que la participación e involucramiento de los padres en el proceso escolar de sus hijos permite a éstos tener mejores resultados, las brechas tecnológicas entre unos y otros generan una barrera para hacer efectiva esta participación.

Es en este marco que opera el proyecto de "Alfabetización digital", generando cursos de alfabetización para adultos. Estos cursos son dictados por estudiantes de las carreras de Ingeniería Civil en Informática e Ingeniería en Informática, supervisados por profesores del Departamento de Informática de la Facultad de Ingeniería de la UTEM. Actualmente se han capacitado más de 50 apoderados de las comunas de Huechuraba y San Miguel. Este programa permite a los apoderados maximizar las herramientas de apoyo escolar disponibles en la red, constituyendo un soporte efectivo en el proceso de desarrollo académico de sus hijos.

Apoyo Financiero del Proyecto

El año 2010 y 2011, estudiantes de la carreras de Ingeniería Civil en Informática e Ingeniería en Informática se adjudicaron Fondos de Desarrollo Institucional (FDI) que permitieron la creación de un laboratorio de computación móvil y una central de apuntes con el fin de apoyar el desarrollo de la "Alfabetización digital".

Objetivo General del Proyecto

Promover un acercamiento entre la comunidad y la Universidad Tecnológica Metropolitana, sobre la base de acciones enmarcadas en un Programa de Responsabilidad Social enfocado en el desarrollo de habilidades y competencias en tecnologías de la comunicación, que posibilite una maximización por parte de la comunidad de las herramientas tecnológicas disponibles para el proceso docente de los estudiantes del sistema escolar.

Objetivos Específicos de Proyecto

- Desarrollar en los apoderados de colegios vulnerables habilidades y competencias en tecnologías de la comunicación.
- Promover una mayor participación y apoyo de los apoderados en el proceso escolar de sus hijos a través del uso de tecnologías de la información.

Desarrollo del proyecto

El proyecto se desarrolla en las escuelas más vulnerables del país. De esta forma La Universidad tendrá un acercamiento al entorno en que se desenvuelven los estudiantes y apoderados.

Se contempló capacitar a un total de 100 apoderados de establecimientos vulnerables en el año 2012, ampliando progresivamente la cobertura hasta llegar a 150 apoderados en año

2014 como parte de un programa permanente de responsabilidad social. Así, se impartieron diez cursos con una cobertura de diez alumnos cada uno. Ello permitió una enseñanza personalizada y un mayor control sobre los avances y logros finales del proceso.

De acuerdo a lo anterior, se obtuvo el reconocimiento de la comunidad por el aporte de la Universidad y los Municipios involucrados por la vía de la disminución de la brecha digital y la ganancia en la eficiencia y eficacia de la utilización de las plataformas digitales disponibles para el apoyo al proceso de enseñanza.

Beneficios y/o impacto del proyecto

Para la UTEM: mejoramiento del proceso académico de los estudiantes de la Universidad a través de un modelo de aprendizaje y servicio en el marco de su política de Responsabilidad Social.

Para el Municipio: posicionamiento de éste como entidad de apoyo a la reducción de la brecha digital en el marco de la Responsabilidad Social.

Para los estudiantes de la UTEM: impacto en el mejoramiento del proceso educativo de los estudiantes, por medio de la optimización de las plataformas educativas disponibles y las competencias asociadas al manejo de tecnologías digitales.

Para los beneficiarios directos: mejor manejo de plataformas digitales para el apoyo del proceso educativo de sus hijos, así como el mejoramiento del desempeño escolar de los mismos.

3. CURSO DE CAPACITACIÓN BÁSICA DE OFIMÁTICA PARA PERSONAS CON DISCAPACIDADES PSÍQUICAS

Este proyecto se enmarcó en un convenio creado entre la UTEM y la Corporación Intégritas, organización sin fines de lucro, de origen familiar, pero con perfil profesional, a través del Departamento de Informática y Computación, por el cual esta casa de estudios, en el marco del Programa de Responsabilidad Social Universitaria, entregó a jóvenes y personas con diagnóstico de discapacidad psíquica que cumplieron satisfactoriamente su etapa de rehabilitación, una serie de cursos de computación en programas de Word, Excel, creación de páginas web, photoshop, etc.

La labor se desarrolla mediante la coordinación entre la Corporación Intégritas y el Departamento de Computación e Informática de la UTEM. Es apoyada, a su vez, por el Departamento de Desarrollo Comunitario de la Municipalidad de Providencia, el cual, a través de la gestión de la Oficina de la Discapacidad, provee el espacio y la infraestructura necesaria para realizar el curso propuesto.

Este Proyecto de Capacitación en Ofimática Básica es realizado por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil en Computación, mención Informática e Ingeniería en Informática, guiado y coordinado por los profesores del Departamento de Informática y Computación, de la Facultad de Ingeniería la UTEM. Se inscribe en un campo nuevo y poco frecuente en nuestro contexto nacional. Los organismos patrocinantes confían en que esta primera línea de capacitación sea el inicio de un programa educativo más amplio, que en el futuro pueda afianzarse y permita cubrir diferentes intereses de las personas rehabilitadas con discapacidad psíquica.

Objetivo General del proyecto

Contribuir a la real integración social y laboral de personas con diversidad funcional psíquica en etapa de rehabilitación, mediante una capacitación profesionalizante en el ámbito de la informática que los prepare para su desempeño en el mundo del trabajo.

Objetivos Específicos del proyecto

- Desarrollar competencias básicas en el ámbito del manejo de programas computacionales tales como Word, Power Point y creación de correos electrónicos.
- Contribuir a desarrollar la autoestima y seguridad personal de los participantes.
- Ampliar el ámbito de las relaciones humanas, creando instancias que favorezcan la comunicación con nuevas personas, tales como nuevos compañeros y nuevos profesores.
- Favorecer el afianzamiento de habilidades funcionales mediante la necesidad de desplazamientos al interior de la ciudad y el manejo de registros.

4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS PROYECTO ENTRE LOS AÑOS 2012-2013

Los proyectos realizados durante los años 2012 y 2013 arrojaron resultados positivos, como lo muestran la tabla 3 en relación a los objetivos específicos del plan estratégico de la UTEM en lo que se refiere a la vinculación con el medio, además de involucrar a estudiantes en actividades diferentes a las acostumbradas, permitiendo que éstos tengan un sello social en su currículum a través del "Aprendizaje y Servicio".

Año	Proyectos	Objetivos específicos	Numero de objetivos cumplidos	Estudiantes involucrados	Docentes involucrados	Personas beneficiadas	Vinculo con el entorno (Si/No)	Cámaras involucradas	Catedras involucradas
2012	Cursos de Ofimática Nivel I	2.4.3-2.4.3-5.1.3-5.2.2	4	2	2	20	Si	2	No
2012	Cursos de Alfabetización Digital	2.4.3-2.4.3-5.1.3-5.2.2	4	50	2	40	Si	2	No
2012	Robótica y C#	2.4.3-2.4.3-5.1.3-5.2.2	4	4	2	28	Si	2	No
2012	Taller (Desarrollo, diseño y publicación de aplicaciones para Windows Phone)	2.4.3-2.4.3-5.1.3-5.2.2	4	8	3	30	No	2	No
2013	Conferencia: "Desarrollo de una plataforma Astro-Informática"	5.1.1-5.2.2	2	0	8	42	Si	0	No
2013	Proyecto web Primer semestre 2013	2.4.3-2.4.3-5.1.3-5.2.2	4	29	2	2100	Si	2	Si
2013	Proyecto web Segundo semestre 2013	2.4.3-2.4.3-5.1.3-5.2.2	4	41	2	2100	Si	2	Si
TOTAL	7		24	85	21	4450	4	12	2
TOTAL 2012	4			74	9	278		8	
TOTAL 2013	3			11	12	4700		4	2

TABLA 3. INDICADORES DE GESTIÓN.

CONCLUSIONES

Las conclusiones deberán mostrar lo que se deriva del trabajo, su relevancia, eventualmente su aplicación, trabajos futuros, etc.

Las referencias se incluyen en orden alfabético al final del texto. Las citas bibliográficas en el texto se deben indicar con el apellido del o los autores y el año de publicación (si son más de dos autores, se debe indicar el apellido del primer autor seguido de et al. y el año de publicación).

Según Allahverdi et al. (2008), los procesos con tiempos de preparación dependientes de la secuencia pueden aumentar los costos de operación. La misma idea se puede expresar de la siguiente manera: los procesos con tiempos de preparación dependientes de la secuencia pueden aumentar los costos de operación (Allahverdi et al., 2008). Por otro lado, Zhu y Wilhelm (2006) estudian este problema asociado al dimensionamiento de lotes, mientras que Vallada y Ruiz (2011) lo hacen asociado a la programación de máquinas paralelas. El pro-

blema de dimensionamiento de lotes ha sido estudiado por numerosos autores (Elmaghraby, 1978;Huang y Yao, 2013; Shirodkar et al., 2011).

REFERENCIAS

Allahverdi A., Ng C.T., Cheng T.C.E., Kovalyov M.Y. (2008): A Survey of Scheduling Problems with Setup Times or Costs. *European Journal of Operational Research*, 187(3), 985–1032.

Elmaghraby S. (1978): The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and Extension. *Management Science*, 24(6), 587 – 598.

Huang J.-Y. and Yao, M.-J. (2013): On the optimal lot-sizing and scheduling problem in serial-type supply chain system using a time-varying lot-sizing. *International Journal of Production Research*, 51(3), 735 – 750.

Shirodkar V., Pillai V. and Sridharan R. (2011): On the feasibility of sequence-dependent economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 49(10), 2925 – 2939.

Vallada E y Ruiz R. (2011): A Genetic Algorithm for the Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Times. *European Journal of Operational Research*, 211 (3), 612–622.

Zhu, X., Wilhelm W.E. (2006): Scheduling and Lot Sizing with Sequence-dependent Setup: A Literature Review. *IIE Transactions*, 38 (11), 987–1007.

Eduardo Benavides B.

*Departamento de Industria,
Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica Metropolitana

Rodrigo Geldes R.

*Departamento de Industria,
Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica Metropolitana

Rafael Loyola B.

*Departamento de Industria,
Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica Metropolitana

Pedro Vergara V.

*Departamento de Industria,
Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica Metropolitana

DETERMINACIÓN DE LA RENTABILIDAD DEL MERCADO PARA EL MODELO DE VALORACIÓN DE ACTIVOS FINANCIEROS, CAPM

INTRODUCCIÓN

Para los financieros es de suma importancia tomar buenas decisiones de inversión al momento de determinar la rentabilidad de sus proyectos y planes de negocios, por lo que, al momento de estimar la tasa de descuento, evaluación de sus ideas de negocios y proyectos, requieren de una adecuada aplicación de modelos que permitan estimar el costo de oportunidad de su capital. Esta es una de las tareas más importantes de la evaluación y gestión para las inversiones empresariales.

Uno de los modelos más utilizados para determinar la tasa de descuento de un proyecto que incorpora el riesgo de estima de la tasa, es la valoración de activos de capital, más conocido como CAPM (Capital Asset Pricing Model). El modelo de Markowitz, del cual deriva el CAPM, plantea la minimización del riesgo del portafolio (medido a través de la varianza), sujeto a un nivel mínimo de rentabilidad esperada. Si se agrega la posibilidad de invertir en un activo de cero riesgo, tendremos que el inversionista podrá

combinar la inversión en activos riesgosos con el de cero riesgo. Imponiendo condiciones de optimización en estas combinaciones de activos, con y sin riesgo, se obtiene el conocido modelo de valoración de activos de capital.

Markowitz (1952, 1959) fue el creador de la Teoría de Portafolios. En esencia, ésta supone que los inversionistas se preocupan básicamente de dos parámetros: la rentabilidad esperada y el riesgo. Este último puede ser medido adecuadamente por la desviación estándar de los retornos. Los inversionistas escogerían portafolios en la Frontera Eficiente tales que, para un nivel determinado de riesgo, no haya otro con una mayor rentabilidad esperada.

Sharpe (1964), Lintner (1965) y Mossin (1966) se basan en los resultados de Markowitz para desarrollar el CAPM o modelo de valoración de activos de capital.

Para llegar a éste, los siguientes supuestos son suficientes:

- Hay un único horizonte de inversión
- Todos los activos son divisibles y transables
- No hay imperfecciones ni impuestos en los mercados de capitales
- Existen expectativas homogéneas
- Puede prestarse y pedirse prestado a la tasa libre de riesgo

Bajo los supuestos anteriores, todos los inversionistas visualizan de la misma forma la frontera eficiente y existirá un único portafolio riesgoso óptimo, que los inversionistas desearán combinar con el activo libre de riesgo.

El CAPM tradicional surge cuando se identifica el portafolio riesgoso óptimo con el Portafolio de Mercado, que resulta ser el único portafolio comprometido idéntico y que puede ser mantenido simultáneamente por los inversionistas. Entonces, la única fuente de riesgo en la riqueza es la variabilidad del portafolio de mercado y, por lo mismo, al considerar los activos individuales, preocupa la contribución de cada uno a dicha variabilidad.

La contribución marginal al riesgo de un portafolio la mide su beta con respecto al portafolio y, como los inversionistas mantienen el portafolio de mercado, la única medida de riesgo pertinente es el beta con respecto al portafolio de mercado. De este modo, surge el modelo CAPM que se muestra en la Fig 1.

En la Fig 1 se describe el esquema de la teoría del portafolio de Markowitz, en el que estableció los beneficios de la diversificación y formuló la línea del mercado de capitales. Esta línea tiene pendiente positiva por la relación directa entre el riesgo y el rendimiento. El punto donde se ubican el riesgo y el rendimiento de un activo individual está siempre por debajo de la línea del mercado de capitales (área sombreada de la gráfica). Invertir en un sólo activo es ineficiente y la diversificación de cartera minimiza esta

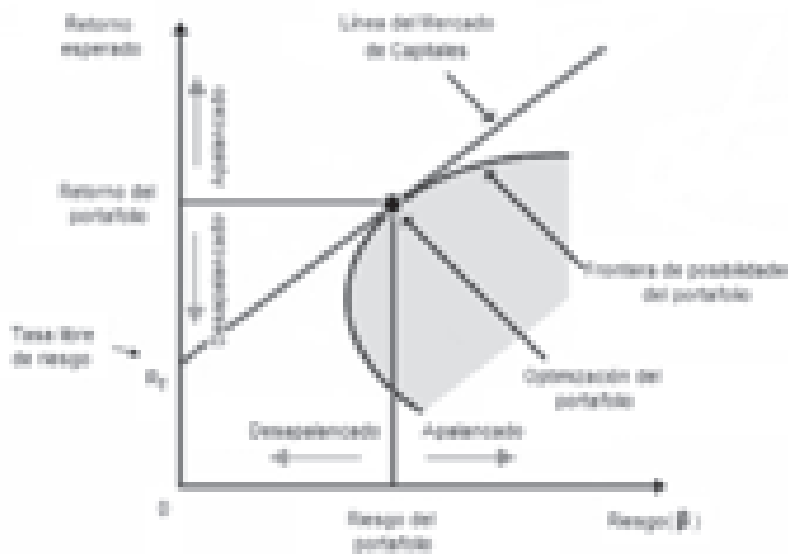


FIGURA 1 EL CAPM: CAPITAL ASSET PRICING MODEL.

falencia, aunque el retorno de portafolio, en conjunto, no alcanza el nivel óptimo.

La propuesta de Sharpe es maximizar cada uno de los activos en forma separada para obtener de este modo el portafolio más rentable. El CAPM se ubica en la frontera del área de Markowitz (línea curva) y maximiza en la tangente a la línea del mercado de capitales en la que el apalancamiento es igual a cero. Esto permite al CAPM construir el portafolio más óptimo al determinar con la mayor precisión los porcentajes de inversión en cada uno de los activos. Para determinar esta fórmula se debe encontrar la relación lineal entre los retornos de una acción determinada y el retorno que se habría obtenido si se hubiese invertido en el portafolio óptimo de mercado. Para ello se introduce el parámetro Beta (β), un índice de componente de riesgo de mercado que es el protagonista central de este modelo.

EL MODELO CAPM

El modelo para estimar la tasa de rendimiento esperada para el CAPM está dada por:

$$E(r_i) = r_f + (E(r_m) - r_f) \cdot \beta_i$$

donde:

$E(r_i)$ = Tasa de rendimiento relevante del proyecto i

r_f = Tasa libre de riesgo

$E(r_m)$ = Retorno esperado del mercado

$(E(r_m) - r_f)$ = Premio por riesgo

β_i = Beta, riesgo sistemático, relaciona el activo con el mercado

con:

$$\beta_i = \frac{\text{cov}(r_i, r_m)}{\text{var}(r_i)}$$

siendo:

$\text{Cov}(r_i, r_m)$ = Covarianza entre el activo riesgoso i y el portafolio de mercado m

$\text{Var}(r_m)$ = Varianza del portafolio de mercado m

El retorno esperado de un activo riesgoso puede expresarse entonces como la suma del retorno de un activo libre de riesgo y el premio por asumir ese riesgo. El precio, entonces, es el producto del factor beta por el precio del riesgo descrito. El beta asociado al portafolio de mercado es igual a uno y si el beta del activo i es mayor que uno, entonces se dice que el activo es más volátil que el mercado.

El coeficiente de riesgo sistemático representa el riesgo no diversificable. El riesgo total se puede definir como:

Riesgo Total = Riesgo sistemático + Riesgo no sistemático

De esta manera, la tasa de descuento relevante para descontar los flujos de caja del inversionista es la que se obtiene directamente del modelo CAPM.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para calcular la tasa de rendimiento de mercado $E(r_m)$, en el modelo CAPM, se utilizan tradicionalmente los indicadores IGPA e IPSA. Sin embargo, en este trabajo se recomienda utilizar el IPSA, dado que contiene las 40 acciones más transadas en la Bolsa de Comercio de Santiago, lo cual permite incorporar en su cálculo la volatilidad que se genera en el mercado de las acciones más transadas en la Bolsa.

Para determinar el promedio anual de variación del IPSA, se utiliza el precio diario de cierre del indicador para posteriormente obtener el promedio anual de variación del indicador (rentabilidad).

Períodos	Promedio de Variación	Días bolsa
2009	0,16%	250
Enero	0,23%	21
Febrero	-0,15%	20
Marzo	0,03%	22
Abril	0,36%	21
Mayo	0,80%	19
Junio	-0,01%	21
Julio	0,20%	22
Agosto	-0,07%	21
Septiembre	0,29%	21
Octubre	-0,08%	21
Noviembre	-0,08%	21
Diciembre	0,48%	20

Períodos	Promedio de Variación	Días bolsa
2010	0,13%	250
Enero	0,31%	20
Febrero	0,03%	20
Marzo	-0,07%	23
Abril	0,13%	21
Mayo	0,03%	20
Junio	0,22%	21
Julio	0,34%	21
Agosto	0,17%	22
Septiembre	0,29%	20
Octubre	0,12%	20
Noviembre	0,05%	21
Diciembre	-0,03%	21

Períodos	Promedio de Variación	Días bolsa
2012	0,01%	247
Enero	0,09%	22
Febrero	0,30%	21
Marzo	0,14%	22
Abril	-0,09%	20
Mayo	-0,28%	21
Junio	0,09%	21
Julio	-0,20%	20
Agosto	-0,08%	22
Septiembre	0,11%	17
Octubre	0,04%	22
Noviembre	-0,15%	20
Diciembre	0,20%	19

Períodos	Promedio de Variación	Días bolsa
2011	-0,06%	252
Enero	-0,25%	21
Febrero	-0,24%	20
Marzo	0,18%	23
Abril	0,21%	20
Mayo	0,03%	22
Junio	-0,05%	21
Julio	-0,38%	21
Agosto	-0,11%	22
Septiembre	-0,45%	21
Octubre	0,59%	19
Noviembre	-0,18%	21
Diciembre	0,02%	21

Períodos	Promedio de Variación	Días bolsa
2013	-0,06%	248
Enero	0,26%	22
Febrero	0,01%	20
Marzo	-0,14%	20
Abril	-0,14%	22
Mayo	-0,11%	21
Junio	-0,19%	20
Julio	-0,34%	22
Agosto	-0,13%	21
Septiembre	0,30%	18
Octubre	0,11%	22
Noviembre	-0,16%	20
Diciembre	-0,12%	20

TABLA 1 VARIACIÓN PROMEDIO IPSA Y DÍAS DE BOLSA.

Con la información obtenida de la Bolsa de Comercio de Santiago, en el menú de ítem de precios y estadísticas, se procedió a calcular la variación del IPSA en cada mes, para calcular el promedio de la variación de cada mes respecto del número de días de Bolsa, para cada uno de

los años en estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Con la información se obtiene que la variación promedio del IPSA en los últimos cinco años es de 0,04% para un total de 1.247 días de Bolsa.

El número promedio de días en Bolsa fue de 20,78, con una rentabilidad promedio día de 0,038% y una rentabilidad promedio mes de 0,795%, con lo que se obtiene una rentabilidad promedio año de 9,55%, que es la que se propone utilizar para éste período.

CONCLUSIONES

En este trabajo se recomienda una fuente de información para determinar la rentabilidad de mercado, en la medida que el inversionista al que se le está calculando el costo de oportunidad de su capital considere la opción de invertir en acciones que componen el IPSA como real alternativa de inversión. Si esto no ocurre, lo que corresponde es tomar la rentabilidad anual del instrumento que sí se ha considerado como alternativo por el inversionista.

En otras palabras, se puede indicar que si un inversionista comprara acciones que transan en el IPSA en enero de 2009 y las vendiera en diciembre de 2013, en términos porcentuales, la rentabilidad promedio anual sería de un 9.55%. Dicho porcentaje no considera el efecto de los dividendos cobrados, solamente considera el diferencial de precio compra y venta, otro punto que no está considerado es el efecto IPC.

BIBLIOGRAFÍA

- **Contreras, E.** 2011. “El CAPM y la estimación de tasas de descuento”. Revista Dinero – Tutorial.
- **Fernández, V.** 2005. “El Modelo CAPM para Distintos Horizontes de Tiempo”. Revista Ingeniería de Sistemas, Volumen XIX.
- **Lintner, John.** 1965. “The Valuation of Risk Assets and the Selection of Risky Investments in Stock Portfolios and Capital Budgets.” Review of Economics and Statistics. 47:1, pp. 13–37.
- **Markowitz, Harry.** 1952. “Portfolio Selection.” Journal of Finance. 7:1, pp. 77–99.
- **Markowitz, Harry.** 1959. Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments. Cowles Foundation Monograph No. 16. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- **Mossin, J.** 1966. Equilibrium in a Capital Asset Market. Econometrica, Vol. 34, N°4
- **Sapag, P. Jose.** 2007. “Evaluación de Proyectos. Guía de Ejercicios Problemas y Soluciones”. Editorial Mc Graw Hill. Bogotá, Colombia.
- **Scaliti, M. A.** 2011. “El CAPM y su aplicación en Mercados Emergentes, sus Variantes y Modelos Alternativos. Trabajo de Investigación Final Maestría en Finanzas. Universidad del CEMA.
- **Sharpe, William F.** 1964. “Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk.” Journal of Finance. 19:3, pp. 425–42.
- **Walker, E.** 2003. “Costo de Capital para empresas reguladas en Chile”. Pontificia Universidad Católica de Chile.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- **Bolsa Comercio Santiago**

www.bolsadecomercio.cl

- **El CAPM, un Modelo de Valorización de Activos Financieros**

www.elblogsalmon.com/conceptos-de-economia/el-capm-un-modelo-de-valoracion-de-activos-financieros

Patricio Olavarrieta S.

UTEM, Ingeniero Civil Electricista U de Ch, Master
Dpl U. Jaime I Castellón España, Departamento Electricidad

polavarr@utem.cl

Manuel Calquín G.

Ingeniero Eléctrico, Universidad
Tecnológica Metropolitana

manuelcalquin@gmail.com

DISEÑO PRELIMINAR DE UNA SALA DE CARGA PARA BATERÍAS DE TRACCIÓN DE PLOMO – ACIDO.

RESUMEN

El presente escrito tiene por objetivo entregar una aproximación al diseño de una sala de carga de baterías traccionarias de plomo-ácido, entregando al proyectista además un acercamiento a las condiciones del emplazamiento, sistemas de ventilación y potencia instalada, a partir de lo que existe en una industria determinada como puede ser el número de maquinarias de propulsión eléctrica y la capacidad de sus baterías. Esta propuesta recoge conocimientos de estudios teóricos y empíricos, basados en proyectos realizados y en tecnologías existentes en el mercado en la última década.

Palabras clave: **Aprendizaje y Servicio, Vinculación con el medio, RSU.**

I. INTRODUCCIÓN

Se entiende por bodegaje la gestión, el traslado y ubicación de mercadería tanto en la superficie base de ella como en altura, incluyendo la operación inversa para sacar de bodega. Los vehículos de tracción eléctrica son utilizados principalmente en la industria del bodegaje debido a que cuentan con versatilidad y bajas emisiones, lo que permite su uso en casi todos los ambientes de trabajo. Este número de bondades se ve opacado por el hecho que este juego de energías (energía cinética y potencial de altura) con que la máquina de tracción eléctrica realiza el bodegaje, tiene un valor finito y por tanto autonomía similar. El depósito de energía es la batería de tracción del móvil, de tiempo largo de recarga, diferente de un estanque de bencina o petróleo, (más de siete horas), por lo que usualmente se utiliza el método de recambio de batería. Subsiste el problema de la carga de

batería y la optimización del tiempo que una batería debe volver a entrar en un proceso de bodegaje. La solución deseada es tener la carga de baterías lo más cerca de la bodega. Esta sala de carga de baterías de tracción, se verá, tiene sus propios problemas que requieren atención. Se da además una proyección del mercado de estas maquinarias, las características de las baterías de tracción en cuanto presencia física e interacción con el medio, ambientes peligrosos y su ventilación adecuada, volúmenes físicos de las diferentes partes de la sala de carga, capacidad de sustentación del piso al trabajo y tránsito de la maquinaria y finalmente el dimensionado eléctrico del recinto.

II. PROYECCIONES

Según la ITA (*Industrial Truck Association*)¹, en 1981 la participación de maquinaria de propulsión eléctrica, en el mercado de Estados Unidos, era de un 50%, mientras que en el 2010, era de 66%. Se espera que para el año 2025 la participación de equipos de manipulación y transporte de carga eléctricos sea de 90%. Esta realidad, es similar en países industrializados y en Chile. La estadística tiene algunos años de retraso, sin embargo, se espera que la tendencia sea similar. Con dicha proyección, se hace necesario que todo proceso industrial que involucre la participación de maquinaria de propulsión eléctrica, deba considerar la carga de baterías de estas maquinarias como uno de los tantos procesos al interior de la industria, con igual relevancia desde el punto de vista de asignación de espacios y evaluación energética, dado que en algunos casos la carga de baterías para uso en maquinarias, puede ser el proceso de mayor demanda de energía eléctrica en la instalación.

III. CARACTERÍSTICAS Y AMBIENTES DE BATERÍAS.

Las baterías de tracción tienen un peso alrededor de 800 kg con un peso específico alrededor de 3 toneladas/m³. A diferencia de las salas de carga de baterías estacionarias, los recintos de carga para baterías de tracción son instalaciones en las que existen maniobras de extracción, cambio y carga de baterías, junto con el acercamiento al recinto de la maquinaria eléctrica que por regla general, pasando por la economía, deja una batería descargada y sale con una cargada. Esto redundará en una instalación con tránsito de personas y maquinarias, produciendo los riesgos asociados, lo cual agrega una dimensión más al diseño proyectado, debiendo esta ser considerada al momento de establecer criterios respecto de aspectos vinculados con obras civiles, eléctricas y de operación.

Otro aspecto relevante es que las baterías de tracción están constantemente inmersas en ciclos de carga y descarga, lo que se traduce en períodos de demanda cíclica sostenida de energía eléctrica por cada batería; comparados con las salas de baterías estacionarias ellas están la mayor parte del tiempo en etapa de carga de mantenimiento debido a su función de entregar energía de respaldo, luego su ciclo de carga va seguido de un largo periodo de baja demanda (carga de mantenimiento). Estas dinámicas mostradas nos permiten deducir que el recinto de carga de las baterías de tracción necesita una mayor demanda de energía eléctrica de la red para un mismo número de baterías atendidas.

Selección de cargadores

Para los efectos de este escrito, se considerarán dos tipos de tecnologías de cargadores: cargadores con transformador de núcleo de hierro con curva decreciente (tipo wa) y cargadores con regímenes de corriente constante (tipo lola),

1. <http://www.indtrk.org/>

ambos tienen tiempos de carga no superiores a 8 horas. Además para este análisis, se consideran baterías de plomo-ácido, abiertas, de placa tubular, en óptimo estado de funcionamiento.

Cualquiera que sea el cargador que se use, se debe tener en cuenta el hecho que la carga de la batería se produce entre un mínimo y un máximo de energía entre sus bornes, esto es que el correcto valor de las variables V e I de la rotulación del cargador permitirán que la batería no presente alguna de las fallas del siguiente listado:

- Sobrecarga.
- Mayor consumo de agua.
- Gasificación excesiva.
- Aumento en la temperatura del electrolito.
- Incremento en la corrosión.
- Desprendimiento de materia activa en la placa positiva.
- Carga no adecuada.

Una vez conocido el voltaje de las baterías, la corriente de los dos cargadores mencionados (transformador de núcleo de hierro o cargadores con regímenes de corriente constante, tipo lola, ambos con tiempos de carga máximo de 8 horas), se define como:

$$I_{cargador} = \frac{14 * C_n}{100} \quad \text{Ec. N}^\circ 1$$

donde C_n es la capacidad nominal de la batería en Ah.

Generación de gases

Las baterías de plomo-ácido emiten oxígeno e hidrógeno, este último es un gas altamente explosivo sobre cierto valor de concentración en la atmósfera. Cuando la batería alcanza el estado de carga completa se produce electrólisis y la consiguiente generación de gases. Este proceso puede darse por finalizado en el lapso

de una hora desde el término del proceso de carga. Según la Ley de Faraday, bajo condiciones normales de presión y temperatura, se requiere para el proceso de electrólisis el equivalente de 26,8 Ah para descomponer agua en 1 gr de H_2 + 8 gr de O_2 .

La norma UNE 50272, considera un ambiente con riesgo de explosión a la concentración de hidrógeno que supera el 4% del volumen del recinto.

IV. REQUISITOS DE VENTILACIÓN

Una habitación correctamente ventilada se considera libre de riesgo de explosión, por lo que se requiere ventilar adecuadamente todo el recinto de carga de forma tal de mantener la concentración de hidrógeno por debajo del 4%. La norma UNE 50272 recomienda como valor seguro el 2% de concentración máxima. Esta consideración se aplica para carga de baterías montadas en el vehículo y fuera de este.

Flujo de aire de ventilación

Por otro lado la norma UNE 50272 permite calcular el valor de la corriente de aire necesaria para ventilación a partir de la ecuación Ec. N° 2, incorporándole un coeficiente s de seguridad a fin de no dar lugar a riesgo:

$$Q = v * q * s * n * I_{gas} * C_n * 10^{-2} \text{ [m}^3/\text{h]} \quad \text{Ec. N}^\circ 2$$

donde:

Q = corriente de aire de ventilación [m^3/h].
 v = disolución de hidrógeno necesaria, factor = 24;
 s = factor de seguridad, normalmente s = 5.
 q = $0,42 * 10^{-3}$ [m^3/Ah] hidrógeno generado por un elemento.
 n = número de elementos. Para las baterías en estudio se tiene que:

$n = 24$ para baterías de 48V.

I_{gas} = corriente que durante la fase de carga produce gas.

C_n = capacidad nominal de la batería [Ah].

Para cargadores normalizados, sin información relativa a la carga, considerar:

$I_{gas} * C_n * 10^{-2}$ como el 25% mínimo de la corriente asignada a cada cargador.

Entonces, el flujo de aire necesario para ventilación, por cada batería conectada en función de la tensión nominal de cada batería y la corriente nominal del cargador, es:

$$Q = 6,3 * 10^{-3} * V_{batería} * I_{cargador} \quad [m^3/h]$$

Ec. N° 3

Además la norma UNE 50272 considera un recinto bien ventilado cuando el volumen libre [V_l] es mayor o igual a:

$$V_l = 2,5 * Q \quad [m^3] \quad \text{Ec. N°4}$$

Q es el total de flujo de aire necesario para ventilar el recinto, por cada batería conectada. Si esto se cumple, la ventilación forzada no es requerida. Sin embargo, las dimensiones del recinto pueden verse limitadas por el espacio disponible para el emplazamiento y en ese caso deberá considerarse algún método de ventilación adicional.

Ventilación natural

En caso de requerir ventilación, ésta debe ser, preferentemente, de forma natural, considerando una entrada y salida de aire, con un área mínima despejada cuya abertura se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A = 28 * Q \quad [cm^2] \quad \text{Ec. N°5}$$

Para este cálculo, se estima una velocidad de la masa del aire mayor o igual a 0,1 m/s en lugares abiertos, recintos bien ventilados o con entradas grandes.

Consideraciones para el diseño de la ventilación natural

La entrada y salida de aire debe estar situada en el lugar más apropiado para facilitar el intercambio de aire. Algunas recomendaciones:

- Crear aberturas en paredes opuestas.
- La separación mínima de las aberturas, en caso de estar en el mismo muro debe ser de a lo menos 2 metros.
- La masa de aire extraída de la sala, debe ser evacuada a la atmósfera lo más rápido posible.

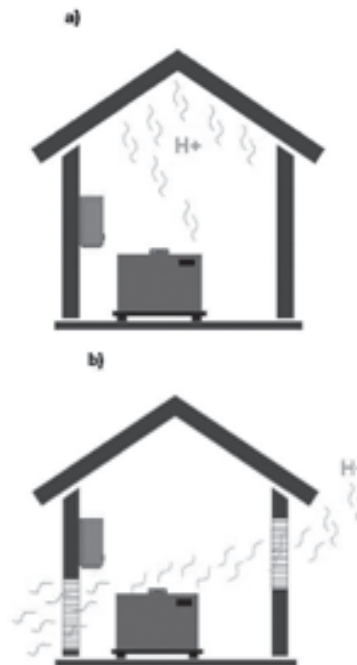


FIGURA N° 1. CONSIDERACIONES PARA FAVORECER LA EVACUACIÓN DE GASES: A) ACUMULACIÓN DE GASES EN LA PARTE SUPERIOR DEL RECINTO, B) EVACUACIÓN DE GASES POR VENTILACIÓN NATURAL.

Ventilación forzada

Cuando no se puede lograr el correcto intercambio de aire a través de ventilación natural, se debe considerar incorporación de mecanismos de ventilación forzada para asegurar la corriente de aire necesaria según el modo de ventilación seleccionado. Se debe considerar que la emisión de gas, continúa hasta una hora después de terminado el proceso de carga de la última batería.

baterías deberá quedar al interior del recinto cerrado, dejando las maniobras de intercambio de baterías y mantención afuera del cierre perimetral, tal como indica la figura nº 2. El cierre perimetral, tiene por objeto restringir el acceso al proceso de carga solo al personal con la adecuada capacitación en la manipulación de baterías de tracción, con ello se evitan accidentes y se mitigan riesgos de emisión de chispas por mala manipulación. Para tener una aproximación del espacio requerido, se debe tener en cuenta lo siguiente:

V. DIMENSIONAMIENTO DEL ESPACIO.

Se debe asegurar la correcta distribución de equipos, mobiliario y accesorios, de forma tal, que asegure el normal desplazamiento y maniobras al interior de la sala de carga. Cuando el espacio es limitado, la maniobra de carga de

- Factor de crecimiento en el mediano y largo plazo.
- Considerar el espacio ocupado por cada batería alrededor de 1 m³.
- Considerar espacio para elementos de seguridad tales como duchas, lava ojos, carros, etc.
- Considerar distancias de seguridad entre baterías y fuentes de chispa o fuentes de calor sobre 300°C, de al menos 0,5 m.

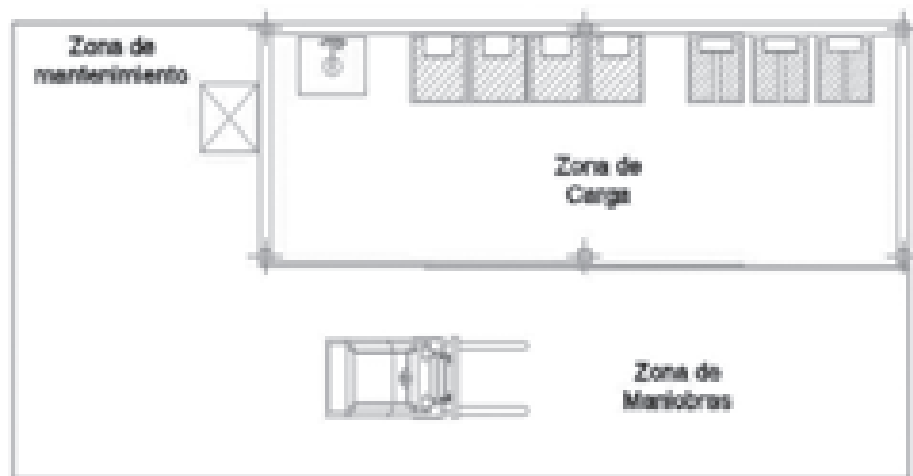


FIGURA Nº 2. DISTRIBUCIÓN DE ESPACIOS Y CIERRE PERIMETRAL

Características del piso

El piso debe ser capaz de soportar la carga normal, provocada por el paso de los equipos, mobiliario y baterías en el interior de la sala de carga de baterías. Adicionalmente se debe considerar la resistencia necesaria para soportar las maniobras de operación de intercambio de baterías varias veces por día.

La maniobra de intercambio de baterías es equivalente a la manipulación de carga al interior del recinto con entrada y salida de equipos manipuladores de carga, portando baterías de peso aproximado a los 800 kg.

El piso debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Estar fabricado con hormigón hidrófugo.
- Estar diseñado para soportar el peso de los elementos más la maquinaria de manipulación de carga.
- Soportar abrasiones del rodado de la maquinaria.
- Debe incorporar una fosa o trinchera de contención de derrames.

VI. CARGA INSTALADA:

En general, la potencia de los cargadores representa casi la totalidad del consumo al interior de un recinto de carga de baterías. El resto de las cargas, corresponden a iluminación y sistemas de ventilación forzada, si lo hubiere. De esta forma, la potencia instalada corresponde, principalmente, a la suma de la potencia nominal de cada cargador de baterías al interior del recinto. La potencia nominal de cada cargador se puede obtener directamente de la placa de características del equipo.

Factor de carga:

Para facilitar las estimaciones de la instalación, se trabajará con valores medios, quedando a criterio del proyectista la última aproximación, de acuerdo a las necesidades de cada caso. Aclarado lo anterior, y para efectos de diseño de la instalación eléctrica del recinto y sus protecciones asociadas, es que se proponen los siguientes factores de carga, en función del número de cargadores conectados y de su potencia nominal.

Factor de carga (f_c)	Nº de equipos
1	$1 < n \leq 5$
0,8	$6 < n \leq 10$
0,65	más de 10

FIGURA Nº 3. FACTOR DE CARGA DE EQUIPOS SIMULTÁNEOS

Potencia Media:

El concepto de demanda media, surge basado en dos fundamentos empíricos: los cargadores no operan a potencia nominal durante todo el período de carga sino que la potencia de carga tiene directa relación con la curva de la corriente de carga, pues no todos los equipos (cargadores) son conectados simultáneamente lo que se traduce en que la potencia conectada es inferior a la potencia total instalada. De esta forma, se puede calcular la potencia media P_m , como la potencia total, corregida por el factor de carga, entendiéndose por potencia total la suma de las potencias de cada cargador conectado al interior del recinto. Entonces:

$$P_m = f_c * \sum P_n \quad \text{Ec. N}^\circ 6$$

VII. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se desea construir una sala de carga de baterías apiladas en racks modulares, tal como indica la figura nº 4. Los datos que se tienen son los siguientes: tensión de las baterías 48 Vdc, capacidad de las baterías: 560 Ah, número de maquinaria: 18 equipos, todos iguales. Se pide determinar: número de cargadores, cálculo de ventilación (natural), potencia instalada y potencia media del recinto. No se considera, para este caso, dimensionar el espacio, dado que esta información varía de caso en caso y requiere de información particular



FIGURA Nº 4. EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE UNA SALA DE CARGA CON 18 CARGADORES.

Alcances del cálculo

Para esta aplicación se utilizarán datos obtenidos de fabricantes de cargadores y baterías con presencia mundial, dado que se persigue demostrar el método y no imponer criterios en la selección de equipos. Se trabajará con un cargador de curva de carga de tipo Iola, por ser una tecnología más reciente, con mejor eficiencia energética.

Del cargador:

Al tratarse de un cálculo preliminar, se recomienda aplicar las ecuaciones planteadas y adaptar los resultados a la disponibilidad de equipos en el mercado local.

La corriente del cargador, de acuerdo con EC. Nº1, es:

$$I_{cargador} = \frac{14 \cdot 560}{100} = 78,4 \text{ Amperes (DC)}$$

Valor cercano más próximo que se comercializa: 80 Amperes.

Valores para conexión a la red:

Según placa de características del cargador:

Tensión de entrada $U = 400$ volt. 3 fases.

Corriente de entrada $I_n = 7,6$ amperes

Factor de potencia = 0,95

Potencia por cargador:

De acuerdo a los datos de placa:

$$P_c = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 7,6 \cdot 0,95 = 5 \text{ [kw]}.$$

Potencia conectada:

$$P_{total} = 18 \cdot 5 = 90 \text{ [kw]}$$

Potencia Media:

De acuerdo a la Ec, Nº6

$$P_{media} = 0,65 \cdot 90 = 58,5 \text{ [kw]}$$

Cálculo de ventilación

De acuerdo a Ec. N° 3 y para 18 baterías conectadas simultáneamente:

$$Q_{total} = 18 * 6,3 * 10^{-3} * 48 * 80 = 435,5 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Resumen de resultados	
Capacidad de baterías	540 A/h
Tensión DC	48 V _{DC}
Corriente de carga	80 A _{CC}
Tensión de entrada	480 V _{AC}
Corriente de entrada	7,6 A _{AC}
Potencia nominal unitaria	5 kW
Carga conectada	90 kW
Potencia media	58,5 kW
Flujo de ventilación necesaria	435,5 m ³ /h

FIGURA N° 5.
RESUMEN DE VARIABLES CALCULADAS

VIII. CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos están basados en datos disponibles a nivel comercial global, corresponden a equipos en uso en la actualidad. El método es útil para la etapa de anteproyecto. Para diseños más exactos, se debe considerar las características específicas de los equipos utilizados en cada caso.

Totalizar las cargas correspondientes a la carga de baterías en un solo recinto permite determinar la energía necesaria para efectos de cálculos de instalación eléctrica, distribución de las cargas y eficiencia energética. No considerar esta carga puede generar inconvenientes pos-

teriores, tales como: Cambios de transformador y líneas antes de lo estimado, mal dimensionamiento del generador de respaldo, compra o arriendo de mayor número de montacargas, modificaciones en las condiciones originales de operación, imposibilidad de cargar baterías en horario de mayor producción.

El cálculo de ventilación ofrece dos mecanismos fundamentales: ventilación natural y ventilación forzada. Es recomendable favorecer siempre la ventilación natural por sobre la ventilación forzada, debido a que esta última depende del estado de los extractores de aire. Un fallo en éstos podría generar una emergencia innecesaria.

BIBLIOGRAFÍA

AENOR, marzo 2001. “Norma Europea UNE EN 50272-2 Requisitos de seguridad para las baterías e instalaciones de baterías. Parte 2: Baterías estacionarias”.

AENOR, marzo 2003. “Norma Europea UNE EN 50272-3 Requisitos de seguridad para las baterías e instalaciones de baterías. Parte 3: Baterías de tracción”.

German Electrical and Electronic Manufacturers, edition April 2004. “Charger assignments for traction batteries in vented (PzS) and in valve regulated (PzV) Desing”.

Manuel Calquín Gutiérrez, Memoria de Título: “Diseño e Implementación de una Sala de Carga para Baterías de Tracción”. Profesor guía, Juan Patricio Olavarrieta Suarez.

Micropower Inc. “MTM-HF MULTICARGADOR AVANZADO” Catálogo General.

Santiago Zapata Cáceres

*Departamento de Informática y
Computación, Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica de Chile
szapata@utem.cl

David Fuentealba Orellana

*Departamento de Informática y
Computación, Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica de Chile
david.fuentealba.info@gmail.com

Gaspar Valenzuela González

*Departamento de Informática y
Computación, Facultad de Ingeniería*
Universidad Tecnológica de Chile
gaspar.valenzuela.g.@gmail.com

APLICACIÓN DEL MODELO DE REPRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN LINGÜÍSTICA 2-TUPLAS CON INFORMACIÓN MULTIGRANULAR

RESUMEN

Se describe la Teoría de la Toma de Decisiones, las etapas que contempla el desarrollo de ésta, las dificultades que se presentan al agregar información lingüística multigranular, información numérica y lingüística. A su vez, se explica cómo debe adaptarse el modelo para evitar las pérdidas de información durante las combinatorias que se realizaran en el proceso de agregación. Una vez contextualizado el trasfondo, se desarrolla un ejemplo con el cual se explica la aplicación de la teoría a un caso organizacional. Dicho caso consiste en la adecuación de la instalación de un ERP (Enterprise Resource Planning) en una empresa, en donde deberán tomarse en cuenta las limitaciones, y con base en éstas, considerar la posterior generación de factores que permitirán dilucidar una solución.

Palabras clave: **toma de decisión, multicriterio, dinámico, información heterogénea, 2-tupla lingüística**

ABSTRACT

Theory Decision Making describes the steps that includes the development of this, the difficulties presented by adding multigranular linguistic information, numerical and linguistic information. In turn, explain how to adapt the model to avoid loss of information during the combinatorial to be undertaken in the aggregation process. Once contextualized the background, an example to which the application of theory to explain organizational case develops. This case is the adequacy of the installation of an ERP (Enterprise Resource Planning) in a company, where shall take into account the limitations, and based on these, the generation of factors that will figure out a solution.

Keywords: **Decision making, multicriteria dynamic heterogeneous information, 2-tuple linguistic**

INTRODUCCIÓN

La evaluación es uno de los procesos más importantes en la industria, con multitud de disciplinas tales como: la evaluación de calidad, la evaluación de desempeño, etc. En todo proceso de evaluación, se realiza un análisis de las características o indicadores del elemento que es objeto de evaluación. Este análisis es similar al que se realiza en los problemas de toma de decisiones, en los que antes de tomar una decisión se lleva a cabo un proceso de análisis que permite privilegiar la coherencia. Además de esto, dicho análisis implica un estudio metódico y analítico, que ayuda a analizar las alternativas e indicadores del elemento que se está estudiando.

En esta investigación centramos nuestro interés en el modelo de representación de información lingüística basado en una representación de 2-tuplas [1], que se crea con la finalidad de mejorar la toma de decisiones en problemas en los que se trabaja con información lingüística, debido a que los modelos más usados en la literatura (Modelo Basado en el Principio de Extensión [2] y Modelo Simbólico [3]) poseen aproximaciones y cálculos que generan “perdida de información” con resultados imprecisos y poco exactos al enfrentar un problema de toma de decisiones, a diferencia del modelo que proponemos, que incluye variables lingüísticas, además de permitir trabajar con información de distinta naturaleza, es decir, lingüística, numérica e intervalar.

Los resultados de esta investigación permitirán obtener resultados más adecuados y ajustados a la realidad, siendo esto un beneficio en el área de la toma de decisiones, actividad habitual en el mundo real y fundamental en multitud de campos, como la ingeniería, la economía, las finanzas o la evaluación.

La toma de decisiones es una actividad que se desarrolla y se trabaja a diario en la vida cotidiana, es por esto que el desarrollo de esta investigación permitirá resolver problemas prácticos en las distintas áreas del conocimiento.

La información obtenida servirá para comentar y apoyar la teoría de la toma de decisiones, y permitirá la relación entre diversas variables de distinta naturaleza, como se mencionó anteriormente, ofreciendo la posibilidad de una exploración y explicación fructífera de la toma de decisiones.

A través de este estudio, se demuestra que se puede desarrollar un mayor número de operadores sobre el modelo de representación con 2-tuplas para poder reflejar cualquier comportamiento de una situación de un problema real y, además, completar la integración de cualquier tipo de información mediante 2-tuplas lingüísticas.

TOMA DE DECISIONES Y EVALUACIÓN

En un sentido amplio, tomar una decisión consiste en elegir la mejor opción o alternativa entre un conjunto de opciones o alternativas posibles. Los problemas de toma de decisión presentan los siguientes elementos básicos [9]:

1. Uno o varios objetivos por alcanzar.
2. Un conjunto de alternativas o decisiones posibles para alcanzar dichos objetivos.
3. Un conjunto de factores o estados de la naturaleza que definen el contexto en el que se plantea el problema de decisión.
4. Un conjunto de valores de utilidad o consecuencias asociados a los pares formados por cada alternativa y estado de la naturaleza.

Dependiendo de las características de los elementos del problema de decisión, estos podrían clasificarse atendiendo a distintos puntos de vista. Por otro lado, el tipo de información que

define el marco del problema y su modelado influirán también en el modelo de resolución del problema de decisión. Se revisará el modelado de preferencias debido a su papel principal en los procesos de toma de decisión, pues este define cómo se expresan el conocimiento, los gustos, las afinidades, etc., que forman parte del problema de toma de decisión.

CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE TOMA DE DECISIONES

Frente a la gran variedad de situaciones o problemas de decisión que se pueden presentar en la vida real, la teoría de la decisión [10, 11] ha establecido una serie de criterios que permiten clasificar los problemas de decisión atendiendo a diferentes puntos de vista:

1. Según el número de criterios o atributos que se han de valorar en la toma de decisión.
2. Según el ambiente de decisión en el que se han de tomar las decisiones.
3. Según el número de expertos que participan en el proceso de decisión.

NÚMERO DE CRITERIOS

El número de criterios o atributos que se tienen en cuenta en los procesos de decisión para obtener la solución permite clasificar a los problemas de decisión en dos tipos:

Problemas con un sólo criterio o atributo. Problemas de decisión en los que, para evaluar las alternativas, se tiene en cuenta un único criterio o atributo que representa la valoración dada a esa alternativa. La solución se obtiene como la alternativa que mejor resuelve el problema teniendo en cuenta este único criterio.

Supongamos un problema de decisión en el que nos planteamos cambiar de auto y nos ofrecen tres posibles alternativas, siendo el criterio de optimización de la decisión el precio. Este

problema de decisión será muy simple de resolver, puesto que previsiblemente se escogerá la alternativa con el menor precio.

En los problemas de decisión de un único criterio, cada alternativa es caracterizada por un único valor. Sea el conjunto de alternativas del problema, una forma de representación de la información del problema se muestra en la Tabla 1:

Alternativas	Valoración
x_1	y_1
...	...
x_n	y_n

TABLA 1. ESQUEMA GENERAL DE UN PROBLEMA DE TOMA DE DECISIÓN CON UN ÚNICO CRITERIO.

Cada entrada y_i de la tabla indica la valoración de la alternativa x_i . Según el marco de definición del problema, cada y_i estará valorada en un dominio de expresión determinado (numérico, lingüístico, etc.).

Problemas multi-criterio o multi-atributo:

Problemas de decisión en los que, para evaluar las alternativas, se tienen en cuenta dos o más criterios o atributos que definen cada alternativa. La alternativa solución será aquella que mejor resuelva el problema considerando todos estos criterios o atributos.

Supongamos el problema presentado anteriormente. Este se complicaría y el proceso para resolverlo sería diferente si, además de considerar el precio, también tuviésemos en cuenta otros criterios o atributos como el diseño y el consumo del auto. En este caso, nos enfrentaríamos a un problema en el que se consideran varios criterios o atributos para tomar una decisión y, por lo tanto, hablamos de un problema de decisión multi-criterio o multi-atributo.

Se asume que el número de criterios en un problema de decisión multi-criterio es finito. Sean $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ y $C=\{c_1, c_2, \dots, c_h\}$ el conjunto de alternativas y el conjunto de criterios, respectivamente, que caracterizan una situación de decisión determinada, entonces una representación de la información del problema podría expresarse mediante la Tabla 2:

Alternativas	Criterios			
(x_i)	C_1	C_2	C_3	C_4
(x_1)	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
...
(x_n)	y_{n1}	y_{n2}	...	y_{nh}

TABLA 4.2. ESQUEMA GENERAL DE UN PROBLEMA DE TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO. CADA ENTRADA y_{ij} INDICA LA PREFERENCIA DE LA ALTERNATIVA, x_i RESPECTO DEL CRITERIO, C_j .

AMBIENTE DE DECISIÓN

El ambiente de decisión viene definido por las características y contexto en el que se va a llevar a cabo la toma de decisiones. La Teoría Clásica de la Decisión distingue tres situaciones o ambientes de decisión [10]:

- 1. Ambiente de certidumbre.** Un problema de decisión está definido en un ambiente de certidumbre cuando son conocidos con exactitud todos los elementos y/o factores que intervienen en el problema. Esta situación permite asignar valores precisos de utilidad a cada una de las alternativas presentes en el problema.
- 2. Ambiente de riesgo.** Un problema de decisión está definido en un ambiente de riesgo cuando alguno de los elementos o factores que intervienen está sujeto a las leyes del azar. En estos casos estos problemas son resueltos utilizando la Teoría de la Probabilidad.
- 3. Ambiente de incertidumbre.** Un problema de decisión está definido en un ambiente de incertidumbre cuando la información disponible sobre las distintas alternativas puede ser

incompleta, vaga o imprecisa, lo que implica que la utilidad asignada a cada alternativa tenga que ser valorada de forma aproximada. Esta incertidumbre surge a raíz del intento de modelar la imprecisión propia del comportamiento humano o la inherente a ciertos fenómenos que por su naturaleza son inciertos. Los métodos clásicos no son adecuados para tratar situaciones en los que la incertidumbre se debe a la aparición de información vaga e imprecisa, como por ejemplo, la que puede surgir al intentar valorar fenómenos relacionados con apreciaciones sensoriales y subjetivas de los expertos.

NÚMERO DE EXPERTOS

Finalmente, otro punto de vista a la hora de clasificar los problemas de decisión hace referencia al número de expertos o fuentes de información que toman parte en el proceso. Un proceso de toma de decisión en el que participan varios expertos es más complejo que otro en el que la toma de decisión se realiza de forma individual. Sin embargo, el hecho de que intervengan varios expertos con puntos de vista diferentes puede ofrecer una solución más satisfactoria al problema.

Atendiendo al número de expertos o fuentes de información que toman parte en la toma de decisión, los problemas de decisión se pueden clasificar en dos tipos:

- 1. Unipersonales o individuales.** Las decisiones son tomadas por un sólo experto.
- 2. En grupo o multi-experto.** Las decisiones son tomadas en conjunto por un grupo de expertos que intentan alcanzar una solución en común al problema.

MODELO DE REPRESENTACIÓN LINGÜÍSTICA BASADO EN 2-TUPLAS

El Modelo de Representación Lingüístico basado en 2-tuplas fue presentado en [1] para mejorar los problemas de pérdida de información en los procesos de computación con palabras de los siguientes modelos:

- **Modelo basado en el Principio de Extensión [2]**
- **Modelo simbólico [3]**

Se ha demostrado que es un modelo útil en el tratamiento de contextos de información no homogéneos [4, 25], puesto que permite mejorar su comprensión y su manipulación matemática con el objetivo de facilitar el proceso de ordenación. Para explicar este modelo de representación de información lingüística basado en 2-tuplas, se debe definir el concepto de "Traslación Simbólica", para representar la información lingüística mediante 2-tuplas.

MODELO COMPUTACIONAL LINGÜÍSTICO PARA LA REPRESENTACIÓN CON 2-TUPLAS

A continuación, se presentan un conjunto de operadores sobre este modelo para las siguientes operaciones:

COMPARACIÓN DE 2-TUPLAS

Sean (s_k, a_1) y (s_l, a_2) dos 2-tuplas, cada una representando una cantidad de información, entonces:

- Si $k < l$ entonces (s_k, a_1) es menor que (s_l, a_2)
- Si $k = l$ puede ocurrir que:
 1. Si $a_1 = a_2$ entonces (s_k, a_1) , (s_l, a_2) representan la misma información
 2. Si $a_1 < a_2$ entonces (s_k, a_1) es menor que (s_l, a_2)
 3. Si $a_1 > a_2$ entonces (s_k, a_1) es mayor que (s_l, a_2)

AGREGACIÓN DE 2-TUPLAS

La agregación consiste en obtener un valor colectivo que exprese la información de un conjunto de valores marginales. El resultado de una operación de agregación debe de ser consistente con la representación de los valores de entrada, por tanto el resultado de la agregación de 2-tuplas debe ser una 2-tupla.

Posteriormente, se presentan un conjunto de operadores de agregación sobre 2-tuplas, algunos basados en operadores de agregación numéricos y otros en operadores de agregación simbólicos.

OPERADOR DE NEGACIÓN DE UNA 2-TUPLA

Se define el operador de negación sobre una 2-tupla lingüística como:

$$Neg(s, \alpha) = \Delta(g - \Delta^{-1}(s, \alpha))$$

Siendo $g + 1$ la cardinalidad de S , $S = \{s_0, \dots, s_g\}$.

PROCESO TDME USANDO EL MODELO BASADO EN 2-TUPLAS LINGÜÍSTICAS

En primer lugar, se deben obtener los valores de preferencia colectiva para cada alternativa mediante un proceso de agregación. Luego, se debe transformar los valores de preferencia de cada experto a 2-tuplas:

expertos	operadores	alternativas			
	y_{ij}	x_1	x_2	x_3	x_4
	p_1	(MB,o)	(M,o)	(M,o)	(B,o)
	p_2	(M,o)	(B,o)	(MB,o)	(A,o)
	p_3	(A,o)	(MB,o)	(M,o)	(M,o)
	p_4	(A,o)	(A,o)	(B,o)	(B,o)

TABLA 5.3. EXPERTOS VS ALTERNATIVAS EN 2-TUPLAS.

Con toda la información expresada con 2-tuplas, ésta se agrega para obtener el vector de valores de preferencia colectiva. Para llevar a cabo este proceso de agregación, en este caso se utilizará el operador media aritmética extendida (se considerará que todos los expertos tienen la misma importancia):

$$\begin{aligned} \bar{x}^e(MB, M, A, A) &= (M, 0) \\ \bar{x}^e(M, B, MB, A) &= (M, -.5) \\ \bar{x}^e(M, MB, M, B) &= (L, .25) \\ \bar{x}^e(B, A, M, B) &= (M, -.25). \end{aligned}$$

El vector de preferencia colectiva obtenido es:

$$\left(\begin{array}{cccc} x1 & x2 & x3 & x4 \\ ((M, 0) & (M, -.5) & (L, .25) & (M, -.25)) \end{array} \right)$$

ANÁLISIS COMPARATIVO

Se ha resuelto el mismo problema de decisión usando tres modelos computacionales distintos, obteniendo los siguientes resultados:

	Grado de dominancia				Conj. solución
	x_1	x_2	x_3	x_4	
Método basado en el P.E	M	M	B	M	$\{x_1, x_2, x_4\}$
Método Simbólico	M	M	B	M	$\{x_1, x_2, x_4\}$
Representación 2 - tuplas	(M,o)	(M, -.5)	(B, -.25)	(M, -.25)	$\{x_1\}$

TABLA 5.4. RESULTADOS CON LOS TRES MÉTODOS.

Analizando la tabla, se puede observar que los resultados del enfoque de representación con 2-tuplas varían con respecto a los dos anteriores, siendo este mucho más preciso. Esto se debe a la utilización como operador de la media aritmética extendida, que entrega un resultado más exacto. Además, se puede observar que el resultado obtenido por medio del enfoque de representación con 2- tuplas constituye un subconjunto de los conjuntos solución obtenidos por los otros modelos operacionales. Esto se debe a que:

- En el método basado en la representación de 2-tuplas, en el vector de preferencias colectivas hay alternativas que tienen igual término lingüístico, pero distinto valor para la traslación simbólica. De esta manera se puede observar sin dificultad cuál es la mejor de las distintas alternativas.
- Los valores con los que trabajan el modelo computacional basado en la aritmética difusa y el modelo computacional simbólico son discretos. Por tanto, cuando distintas alternativas en su valor final tienen el mismo valor colectivo, resulta imposible decidir cuál de ellas es mejor sobre el resto.

PROCESO DE AGREGACIÓN DE INFORMACIÓN NUMÉRICA Y LINGÜÍSTICA BASADO EN EL MODELO DE REPRESENTACIÓN LINGÜÍSTICA CON 2-TUPLAS

De manera de prevenir los problemas, que son producto de la combinatoria de información, se realizará un proceso de agregación basado en el modelo de representación lingüístico con 2-tuplas descrito en los siguientes pasos:

1. Como primer paso, se dan a conocer las funciones de transformación entre la información numérica y lingüística (esta última en 2-tuplas), valoradas en un conjunto de etiquetas S. Luego, para garantizar que las funciones mencionadas sean biyectivas, se definirá un conjunto de condiciones.
2. Una vez definidas las funciones de transformación, se comienza el proceso de agregación, el cual se describe en el siguiente esquema:

Paso 1. Uniformar la información numérica y lingüística.

- Seleccionar el conjunto básico de términos lingüísticos (CBTL) sobre el que se unificará la información.
- Convertir los valores numéricos valorados en [0,1] en 2-tuplas lingüísticas valoradas en CBTL, ST.
- Convertir las etiquetas lingüísticas de entrada valoradas en S en 2-tuplas valoradas en ST.

Paso 2. Agregación de las 2-tuplas obtenidas en el paso anterior.

Paso 3. Vuelta Atrás.

Consiste en revertir los valores colectivos inscritos en las 2-tuplas (los cuales están valorados en el conjunto de etiquetas ST), en los dominios de expresión iniciales.

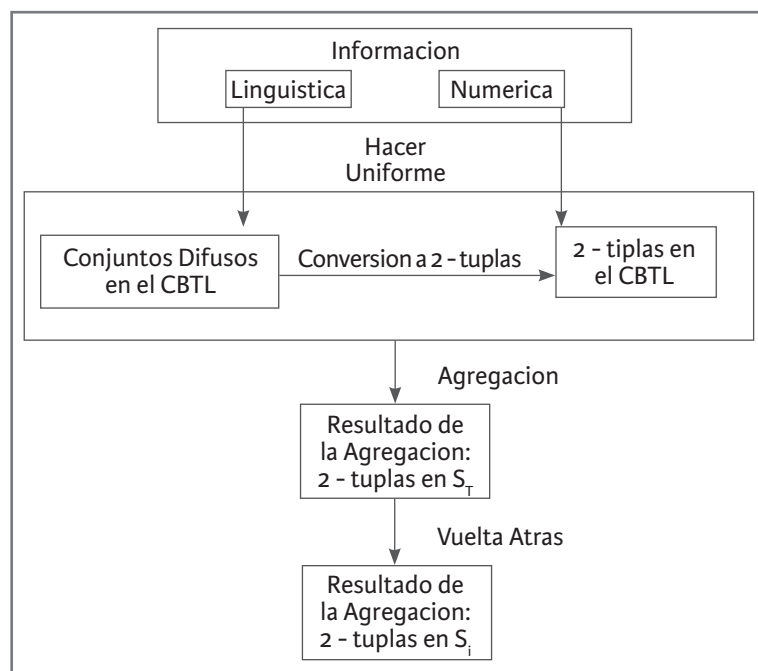


TABLA 5.4. PROCESO DE AGREGACIÓN DE INFORMACIÓN LINGÜÍSTICA Y NUMÉRICA.

ESTUDIO DE TDME SOBRE LA ADECUACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UN ERP

Los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP: Enterprise Resource Planning) son sistemas de gestión de información que automatizan muchas de las prácticas de negocio asociadas con los aspectos operativos o productivos de una empresa [28, 29]. El proceso de decisión sobre la conveniencia de instalar un sistema ERP en una empresa, consiste en considerar las opiniones proporcionadas por varios expertos sobre una serie de parámetros [30]. De esta forma, este problema puede ser modelado como un problema TDME.

En un problema de Toma de Decisión con Múltiples Expertos (TDME), se tiene un conjunto finito de alternativas $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ con $n \geq 2$, así como un conjunto finito de expertos $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ con $m \geq 2$ que tienen como objetivo alcanzar una solución al problema, teniendo en cuenta las opiniones de todos los expertos. Los expertos suministran, de acuerdo a su conocimiento, las preferencias para cada una de las alternativas utilizando algún modelo de representación disponible, como vectores de utilidad o relaciones de preferencia. En la mayoría de los problemas de Toma de Decisiones con múltiples fuentes de información que encontramos en la literatura, los expertos generalmente expresan sus preferencias en un único dominio de expresión, numérico, intervalar o lingüístico [18]. Así, si los atributos a valorar tienen una naturaleza cuantitativa, expresar las preferencias mediante valoraciones numéricas suele ser adecuado. Sin embargo, ocurre a veces que estas valoraciones no pueden ser expresadas de forma exacta, debido a su propia naturaleza, o bien por depender de factores desconocidos o no predecibles. En estos casos, se utiliza un modelo de preferencias de intervalos numéricos, ya que estos representan la incertidumbre asociada a

la preferencia mediante un rango de valores. Si se trabaja con atributos cualitativos, este modo de modelar las preferencias no es el más idóneo, debido a la propia naturaleza de los atributos a valorar, siendo el Enfoque Lingüístico Difuso más adecuado para estos casos, pues se adecua mejor para expresar el conocimiento sobre este tipo de atributos.

Ofrecer una mayor flexibilidad al experto que participa del problema de decisión a la hora de proveer sus preferencias, es una difícil tarea. Dependiendo del área del que proviene el experto, de su conocimiento sobre las alternativas a valorar y/o de la naturaleza de las mismas, puede expresar su conocimiento en el dominio de expresión que le resulte más cómodo para que sus valoraciones se ajusten lo máximo posible a su conocimiento real sobre las mismas.

Por lo tanto, el esquema de definición del problema es el siguiente:

Primero, se tiene un conjunto finito de alternativas:

$$X = \{x_1, \dots, x_n\} \text{ con } n \geq 2$$

Y un conjunto finito de expertos:

$$E = \{e_1, \dots, e_m\} \text{ con } m \geq 2$$

Luego, los expertos expresarán sus preferencias o bien mediante relaciones de preferencia:

$$P_{ek} = \begin{pmatrix} p_{11}^k & \dots & p_{1n}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}^k & \dots & p_{nm}^k \end{pmatrix}$$

En donde es el grado de preferencia de la alternativa i sobre la alternativa j dado por el experto k , o bien mediante vectores de utilidad:

$$P_{ek} = (p_1^k, p_2^k, \dots, p_n^k)$$

Donde P_i^k es la valoración de la alternativa i dada por el experto k .

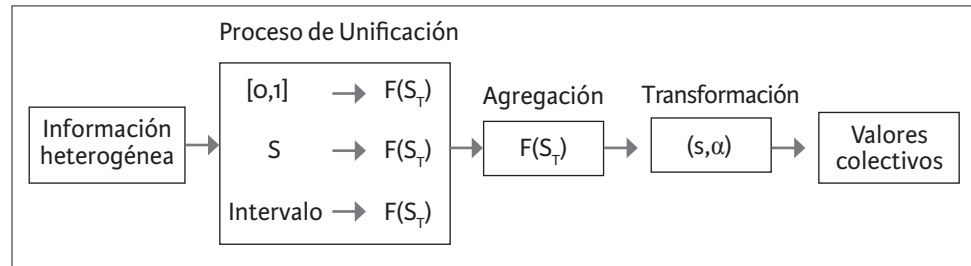


FIGURA 6.3. PROCESO DE AGREGACIÓN DE INFORMACIÓN HETEROGÉNEA.

Se utilizará un modelo de decisión para una empresa que está estudiando y considerando la posibilidad de instalar un ERP, buscando mejorar los procesos y la planificación dentro de su organización. En este caso, se tendrán en cuenta nueve parámetros de la empresa, valorados en diferentes dominios para la evaluación de la conveniencia de la instalación del sistema ERP [34]:

X_1 : Inversión en TI	Valor intervalar	Valor máximo: 6000
X_2 : Costo de implementación	Valor numérico	Valor máximo: 240000
X_3 : Urgencia de implementación	Conjunto T.L	A
X_4 : Grado de abstracción	Conjunto T.L	C
X_5 : Integración con otros subsistemas	Valor numérico	Entre [0,1]
X_6 : Grado de adaptabilidad	Conjunto T.L	C
X_7 : Cambio de requerimientos por el usuario	Conjunto T.L	B
X_8 : Disponibilidad del personal	Conjunto T.L	B
X_9 : Calidad y la visibilidad de la Información	Conjunto T.L	D

Conjunto A		Conjunto B		Conjunto C		Conjunto D	
A_0	(0, 0, .12)	B_0	(0, 0, .16)	C_0	(0, 0, .25)	D_0	(0, 0, 0, 0)
A_1	(0, .12, .15)	B_1	(0, .16, .33)	C_1	(0, .25, .5)	D_1	(0, .01, .02, .07)
A_2	(.12, .25, .37)	B_2	(.16, .33, .5)	C_2	(.25, .5, .75)	D_2	(.4, .1, .18, .23)
A_3	(.25, .37, .5)	B_3	(.33, .5, .66)	C_3	(.5, .75, 1)	D_3	(.17, .41, .58, .65)
A_4	(.37, .5, .62)	B_4	(.5, .66, .83)	C_4	(.75, 1, 1)	D_4	(.32, .42, .58, .65)
A_5	(.5, .62, .75)	B_5	(.66, .83, 1)			D_5	(.58, .63, .80, .86)
A_6	(.62, .75, .87)	B_6	(.83, 1, 1)			D_6	(.72, .78, .92, .97)
A_7	(.75, .87, 1)					D_7	(.93, .98, .99, 1)
A_8	(.87, 1, 1)					D_8	(1, 1, 1, 1)

FIGURA 6.2. SEMÁNTICA DE LOS CONJUNTOS DE TÉRMINOS LINGÜÍSTICOS.

En este caso, cuatro expertos evalúan la conveniencia del ERP proporcionando sus preferencias en los parámetros por medio de vectores de utilidad. Estas preferencias se muestran en la tabla 6.3:

	E_1	E_2	E_3	E_4
X_1	[3500, 4000]	[2000, 2500]	[3100, 3800]	[4500, 5000]
X_2	12000	18000	10000	16000
X_3	A_5	A_6	A_5	A_4
X_4	C_2	C_2	C_3	C_1
X_5	.2	.35	.75	.3
X_6	C_1	C_1	C_2	C_3
X_7	B_3	B_4	B_3	B_4
X_8	B_4	B_5	B_5	B_3
X_9	D_1	D_6	D_5	D_5

TABLA 6.3. VECTORES DE UTILIDAD DE LOS EXPERTOS.

Se puede observar que la interpretación de los parámetros evaluados es distinta, dependiendo de la semántica de cada parámetro. De este modo, X_2 , X_5 , X_6 , X_7 y X_8 son parámetros que, si tienen un valor alto, indican un grado bajo de aceptación (interpretación decreciente), mientras que el resto de los parámetros tiene una interpretación creciente, es decir: a mayor valor, mayor aceptación. Para facilitar las operaciones

de agregación, debemos homogeneizar las interpretaciones de los parámetros y tratarlas todas de forma decreciente o creciente. Para ello, transformaremos los parámetros X_2 , X_5 , X_6 , X_7 y X_8 de forma que sus valoraciones y su interpretación sean crecientes y similares al del resto de los parámetros. De esta manera, los parámetros siempre tendrán una interpretación creciente y podremos operar fácilmente sobre ellos.

En la tabla 6.4., podemos ver los vectores de utilidad proporcionados por los expertos después de normalizar la información numérica y de haber transformado los parámetros a una interpretación creciente.

	E_1	E_2	E_3	E_4
X_1	[.58, .67]	[.33, .42]	[.52, .63]	[.75, .83]
X_2	.5	.25	.58	.33
X_3	A_5	A_6	A_5	A_4
X_4	C_2	C_2	C_3	C_1
X_5	.8	.65	.25	.7
X_6	C_3	C_3	C_2	C_1
X_7	B_3	B_2	B_3	B_2
X_8	B_2	B_1	B_1	B_3
X_9	D_1	D_6	D_5	D_5

TABLA 6.4. INTERPRETACIÓN NORMALIZADA Y CRECIENTE. VECTORES DE UTILIDAD DE LOS EXPERTOS.

Aplicando el modelo de decisión presentado anteriormente, realizaremos los siguientes pasos:

1. Fase de agregación.

Esta fase tiene como objeto obtener un valor colectivo para cada una de las alternativas valoradas por los distintos expertos en los diferentes dominios (numérico, intervalar y lingüístico). Para ello, es necesario efectuar los siguientes pasos debido a que manejamos información no homogénea:

Antes de agregar la información heterogénea, necesitamos expresarla en un marco común para poder operar sobre la misma. Este proceso consiste en unificar la información de entrada (heterogénea) en un único dominio de expresión. Entre los distintos dominios que podemos seleccionar, hemos decidido unificar sobre el dominio lingüístico. Esta decisión se debe principalmente a que gracias al uso de este tipo información facilitaremos la comprensión de los resultados por parte de todos los expertos que participan en el proceso.

a) Unificación de información:

Para realizar la unificación de la información se selecciona un conjunto de etiquetas, que se denomina Conjunto Básico de Términos Lingüísticos (CBTL) y se simboliza como por ST. En este proceso de unificación cada valor de preferencia numérico, intervalar y lingüístico suministrado por un experto debe ser expresado en el CBTL. Para realizar este proceso, se propone convertir cada valor de entrada en un conjunto difuso sobre el CBTL, F (ST). Para llevar a cabo esta unificación se realizarán los siguientes pasos:

- Seleccionar el CBTL. En este caso, se escogerá como ST un conjunto de términos distribuido simétricamente y de forma uniforme con 15 etiquetas [4].
- Transformar los valores numéricos del intervalo $[0; 1]$ al F (ST).
- Transformar los intervalos al F (ST).
- Transformar los términos lingüísticos al F (ST).

b) Agregación de los vectores de utilidad individuales:

Una vez unificada la información mediante F (ST), se pretende obtener para cada alternativa un valor colectivo. Para ello, agregaremos los conjuntos difusos valorados en el CBTL que representan la valoración individual que cada experto ha asignado a esa alternativa, por medio de un operador de agregación. Por lo tanto, cada valor de preferencia colectiva será un conjunto difuso en el dominio lingüístico CBTL. En un proceso de decisión durante la fase de explotación, las preferencias colectivas serán ordenadas para construir una solución. Para facilitar este proceso de ordenación, transformaremos estos conjuntos difusos colectivos en 2-tuplas lingüísticas que se han demostrado útiles para esta fase de la decisión.

En este caso, se utilizará como operador de agregación la media aritmética, pero es posible usar otros operadores, dependiendo de si es que se consideran todos los parámetros como igualmente importantes. En la Tabla 6.9 se muestra el resultado del proceso de agregación:

conjunto difuso valorado en el CBTL, se transformará en una 2-tupla lingüística valorada en el CBTL para facilitar procesos de ordenación de las alternativas en función de dicha valoración, y construir la solución del problema de forma fácil y directa.

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
$(s_8, 0)$	$(s_6, -.2)$	$(s_9, -.2)$	$(s_7, -.1)$	$(s_9, -.3)$	$(s_8, -.2)$	$(s_6, -.2)$	$(s_4, -.1)$	$(s_{11}, 0)$

TABLA 6.9. VECTOR DE UTILIDAD COLECTIVO EXPRESADO POR MEDIO DE UNA 2-TUPLA LINGÜÍSTICA.

2. Fase de explotación.

En la fase de explotación, una vez que se tienen los valores de preferencias colectivas de cada una de las alternativas, podemos obtener la mejor alternativa o el mejor conjunto de alternativas. Se busca obtener una valoración global de todas las alternativas, lo que proporcionará un grado de adecuación. Este grado de adecuación se compara con los valores de una tabla de recomendación (Tabla 6.11). Esta tabla de recomendación ha sido obtenida de forma experimental y expresa una recomendación a partir del grado de adecuación obtenido en

X_1	(0, 0, 0, 0, .10, .25, .21, .39, .5, .32, .10, .25, .17, 0, 0)
X_2	(0, 0, 0, .14, .21, .14, 0, .25, .21, .03, 0, 0, 0, 0, 0)
X_3	(0, 0, 0, 0, 0, .07, .16, .43, .54, .62, .47, .31, .11, .02, 0)
X_4	(.05, .16, .17, .28, .38, .44, .49, .60, .49, .44, .38, .28, .17, .11, .05)
X_5	(0, 0, 0, 0, .14, .10, 0, 0, 0, .25, .25, .17, .07, 0, 0)
X_6	(.05, .16, .17, .25, .30, .30, .30, .40, .41, .46, .52, .48, .34, .22, .10)
X_7	(0, 0, .12, .27, .47, .64, .64, .64, .34, .19, .04, 0, 0, 0, 0)
X_8	(.15, .48, .53, .51, .46, .4, .32, .32, .17, .09, .02, 0, 0, 0, 0)
X_9	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, .25, .5, .58, .69, .55, .41, .3)

TABLA 6.8. INFORMACIÓN AGREGADA.

c) Transformar el vector de utilidad colectivo a 2-tupla:

El valor colectivo obtenido para cada una de las alternativas, expresado por medio de un

esta fase. Se utilizará como operador la media aritmética para 2-tuplas [1], suponiendo de esta forma que todas las alternativas son igualmente importantes en la instalación del sistema ERP.

Grado de adecuación	Recomendación
$\leq s_4$	No instalar
$> s_4 \text{ y } \leq s_6$	La instalación no es conveniente
$> s_6 \text{ y } \leq s_9$	La instalación es factible
$> s_9 \text{ y } \leq s_{11}$	La instalación es conveniente
$> s_{11}$	La instalación es muy conveniente

TABLA 6.10. EJEMPLO DE TABLA DE RECOMENDACIÓN.

Por lo tanto, si consultamos Tabla 6.10 para ese grado de adecuación, la instalación del ERP es factible, pero es posible inferir que no es totalmente conveniente.

CONCLUSIONES

Al tratarse de un contexto de una situación aplicable al modelo de la Toma de Decisiones, podemos concluir que las 2 fases fundamentales que procesan la información, y que por ende determinaran la resolución de los problemas, son: el proceso de agregación y el proceso de explotación. A lo largo de la investigación, hemos comprobado que la pérdida de información, la operatividad de la información lingüística multigranular y el manejo de los pares de información numérica y lingüística son aspectos clásicos de los modelos comúnmente utilizados para resolver problemas de esta índole.

En esta investigación hemos presentado el estudio de la conveniencia de la implementación de un ERP en una empresa u organización, cuyo proceso evalúa varios parámetros de las condiciones actuales de la empresa, de acuerdo a las opiniones de los expertos. Estos parámetros se evalúan en diferentes dominios de información y combinan la información heterogénea proporcionada por los expertos para la obtención de una medición general de la conveniencia o idoneidad de la instalación del sistema ERP. Este proceso proporciona una

mayor flexibilidad que otros, que obligan a los expertos a ofrecer sus opiniones en un dominio de expresión único.

En la actualidad las tecnologías de información juegan un papel muy importante en las estrategias de negocios, ya que están cambiando la forma en que las empresas realizan sus procesos. Los sistemas de información, permiten a las compañías lograr ventajas competitivas de diferentes maneras: coordinando actividades de valor en localidades que se encuentran alejadas de centros urbanos, o también mediante la creación de nuevas interrelaciones entre los negocios, ampliando el alcance de las industrias. Asimismo, le sirve a las empresas para soportar sus estrategias competitivas, ya sea para ir un paso adelante de la competencia o reducir las ventajas que la misma pueda presentar.

El ERP es un sistema integral de gestión empresarial que está diseñado para modelar y automatizar la mayoría de procesos en la empresa (área de finanzas, comercial, logística, producción, etc.). Su misión es facilitar la planificación de todos los recursos de la empresa. Una empresa que no cuente con un sistema ERP, en función de sus requisitos, puede encontrarse con muchas aplicaciones de software cerradas, que no se pueden adaptar a su negocio. Un sistema ERP ofrece diseño de ingeniería para mejorar el producto, seguimiento del cliente desde la aceptación hasta la satisfacción completa, una compleja administración de interdepen-

dencias de los recibos de materiales, de los productos estructurados en el mundo real, de los cambios de la ingeniería y de la revisión y la mejora, la necesidad de elaborar materiales sustitutos, etc.

La seguridad está incluida dentro del ERP para proteger a la empresa u organización en contra de los piratas informáticos, tal como el espionaje industrial y la malversación de cuentas. Una falsificación en el escenario de los datos puede alterar el recibo de materiales, como por ejemplo: calibración de controles relacionados con parámetros de seguridad de la aplicación, password, user id, intentos fallidos y autenticación, entre otros.

Hay conceptos de planificación y ventas (los que incluyen CRM o la relación administrativa con los consumidores, back end o el trabajo interno de la compañía para gestionar y satisfacer las necesidades de los consumidores) que incluye control de calidad en los productos finales y cadena de abastecimiento (interacción con los proveedores y la infraestructura). Todo esto puede ser integrado a través de la ERP.

La resolución de problemas a través del modelado lingüístico de preferencias, el cual se aplica a diversas áreas, destacándose en este trabajo el área de la toma de decisiones, se compone principalmente de dos fases:

- Proceso de Agregación
- Proceso de Explotación

Estos procesos se encargan de manejar las valoraciones lingüísticas mediante modelos computacionales que representan la información, utilizando aproximaciones tales como El Modelo basado en el Principio de Extensión y El Modelo Simbólico para enfrentar los siguientes problemas:

- La pérdida de información.
- Dificultad para operar en contextos con in-

formación lingüística multigranular.

- Dificultad para operar en contextos con información lingüística y numérica.

Tomando en cuenta estas limitaciones, los resultados de esta investigación pueden resumirse de la siguiente forma: el Modelo de Representación de Información Lingüística con 2-tuplas efectivamente sí soluciona el problema de pérdida de información, destacándose las siguientes cualidades:

- Es un modelo de representación continuo, es decir, puede representar cualquier información de un contexto en discusión (en este caso un contexto organizacional), haciendo uso de las 2-tuplas lingüísticas.

- Incorpora un modelo computacional que permite operar con 2-tuplas lingüísticas, superando la problemática de la pérdida de información. El problema de agregar información lingüística valorada en conjuntos de términos lingüísticos con distinta granularidad representa una problemática desde el punto de vista de las herramientas disponibles para normalizar esta información, y de operadores de agregación sobre esta. El Modelo de Representación de Información Lingüística con 2-tuplas, con información multigranular, realiza su aporte con las siguientes cualidades:

- Posee funciones que permiten normalizar la información lingüística multigranular en un único conjunto de términos lingüísticos.
- Se enmarca en un proceso de agregación sobre la información expresada de forma uniforme (bajo un dominio único).

Con estas herramientas, la agregación de información lingüística multigranular resulta ser un proceso menos complejo.

El Modelo de Representación de Información Lingüística con 2-tuplas aporta:

- Funciones de transformación biyectivas entre valores numéricos y 2-tuplas lingüísticas.
- Un proceso de agregación sobre la información de entrada una vez que ha sido transformada. Finalmente, se ha corroborado que la operación de información lingüística y numérica es posible operarse con un menor grado de dificultad. Esto se debe a que si la información se encuentra normalizada (en un único dominio), resulta ser más manipulable, otorgando una mayor facilidad.

En este trabajo se planteó un caso organizacional sujeto a una evaluación, desde el punto de vista de las variantes que actúan sobre el problema en una empresa determinada. El rol de la toma de decisiones en este caso consistiría en procesar la información pertinente a cada área de trabajo, y clasificarla de la misma manera que los expertos (encargados de áreas) vislumbren la situación.

Teniendo en cuenta esto, y que además los datos obtenidos no se encontrarán expresados de manera uniforme, se procede a acudir a un lenguaje natural que exprese las valoraciones de los ejecutivos respecto a los eventos en discusión. En este punto surgen las variantes de los pesos que se encuentran adheridos a cada variable, las repercusiones en otras áreas y las pérdidas a largo y corto plazo, que en conjunto desarrollan la granularidad de la situación.

TRABAJOS FUTUROS

Luego de describir los ámbitos que abarca la Teoría de Toma de Decisiones, y teniendo en cuenta que existe un software capaz de asistir a la mayoría de los usuarios promedio y permitirles tratar situaciones de esta índole, se puede asegurar su aplicación en las áreas tales como:

- Deportes. Con base en los antecedentes de [41], teniendo en cuenta los conocimientos

específicos en algún deporte, además de las percepciones cognitivas (atención, memoria y anticipación), emocionales (interpretación, confianza, entre otras), y la táctica que se debe aplicar durante las horas de entrenamiento para conseguir el máximo rendimiento, se puede diseñar un modelo que permita anticiparse a los resultados y elaborar una respuesta a tiempo ante estos escenarios.

- Medicina. La labor asistencial del médico se realiza, desde el punto de vista técnico, mediante la constante toma de decisiones. Por ello, el proceso de solución de los problemas de salud de individuos enfermos puede ser considerado como un proceso de Toma de Decisiones, en este caso, decisiones médicas. La relevancia de este aspecto es reconocida por importantes textos de Medicina [42]. Un trabajo en conjunto entre expertos en el área de la medicina junto con la Teoría de la Toma de Decisiones podría contribuir a agilizar el proceso de diagnóstico y entregar respuestas a corto plazo, permitiendo re-invertir el recurso tiempo en otras tareas.

- Con respecto al Modelo 2-Tuplas analizado, es ideal que un próximo trabajo se enfoque netamente en explotar el conocimiento disponible en otras áreas a través de este software, ya que en el presente trabajo tuvimos que contextualizar la mayor parte de la teoría para poder explicar el caso de ERP y ejemplificarlo con un software. El ideal sería que investigaciones futuras se basaran más en la facilidad que otorga el software con la operación matemática que hace algunos años atrás era manual.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 F. Herrera and L. Martínez.** “Un nuevo modelo de representación de información lingüística basado en 2-tuplas para la agregación de preferencias lingüística”. 1999.
- 2 R. Degani and G. Bortolan.** The problem of linguistic approximation in clinical decision making. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2:143–162, 1988.
- 3 M. Delgado, J.L. Verdegay, and M.A. Vila.** Linguistic decision making models. *International Journal of Intelligent Systems*, 7:479–492, 1993.
- 4 F. Herrera, E. Herrera-Viedma, L. Martínez, F. Mata, and P.J. Sanchez.** A Multi-Granular Linguistic Decision Model for Evaluating the Quality of Network Services. *Intelligent Sensory Evaluation: Methodologies and Applications*. Springer, Ruan Da, ZengXianyi (Eds.), 2004.
- 5 C. Carlsson and R. Fuller.** Fuzzy Reasoning in Decision Making and Optimization, volume 82 of *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing Series*, 2001.
- 6 S.J. Chen and C.L. Hwang.** Fuzzy multiple attribute decision-making methods and applications. Springer-Verlag, 1992.
- 7 L.A. Zadeh.** The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning. *Information Sciences*, 1975.
- 8 D. Dubois and H. Prade.** *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Kluwer Academic, New York, 1980.
- 9 S. Zadrozny and J. Kacprzyk.** Computing with words for text processing: An approach to the text categorization. *Information Sciences*, 176(4):415–437, 2006.
- 10 R. Duncan and H. Raiffa.** *Games and decision. Introduction and critical survey*. Dover Publications, New York, 1985.
- 11 E. Triantaphyllou.** *Multi-criteria decision making methods: a comparative study*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2000.
- 12 P. Fortemps and R. Slowinski.** A graded quadrivalent logic for ordinal preference modelling: Loyola-like approach. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 1:93–111, 2002.
- 13 M. Oztürk, A. Tsoukiàs, and Ph. Vincke.** Preference Modelling, pages 27–72. In: *State of the Art in Multiple Criteria Decision Analysis*, M. Ehrgott, S. Greco and J. Figueira (Ed.). *Wiley Series on Intelligent Systems*. Springer-Verlag, 2005.
- 14 M. Roubens and Ph. Vincke.** *Preference modelling*. Springer-Verlag, 1985.
- 15 E. Herrera-Viedma, F. Herrera, and F. Chiclana.** A consensus model for multipersonal decision making with different preference structures. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-A*, 32(3):394–402, 2002.
- 16 H. Nurmi.** Assumptions of Individual Preferences in the Theory of Voting Procedures, pages 142–155. In: J. Kacprzyk and M. Roubens, Eds., *Nonconventional Preference Relations in Decision Making*. Springer-Verlag, 1988.
- 17 S.J. Chen and C.L. Hwang.** Fuzzy multiple attribute decision-making methods and applications. Springer-Verlag, 1992.
- 18 F. Herrera, L. Martínez, and P.J. Sánchez.** Managing non-homogeneous information in group decision making. *European Journal of Operational Research*, 166(1):115–132, 2005.

- 19 G.J. Klir and B. Yuan.** Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and Applications. Prentice-Hall PTR, 1995.
- 20 L.A. Zadeh.** The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning. *Information Sciences*, Part I, II, III, 8,8,9:199–249,301–357,43–80, 1975.
- 21 P.P. Bonissone.** A fuzzy sets based linguistic approach: Theory and applications, pages 329–339. *Approximate Reasoning in Decision Analysis*, North-Holland, 1982.
- 22 G. Bordogna, M. Fedrizzi, and G. Pasi.** A linguistic modeling of consensus in group decision making based on OWA operators. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Part A: Systems and Humans, 27:126–132, 1997.
- 23 M. Tong and P.P. Bonissone.** A linguistic approach to decision making with fuzzy sets. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 10:716–723, 1980.
- 24 F. Herrera, E. Herrera-Viedma, and L. Martínez.** A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making. *Fuzzy Sets and Systems*. 114 43–58, 114:43–58, 2000.
- 25 F. Herrera and L. Martínez.** A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multi-granularity hierarchical linguistic contexts in multiexpert decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Part B: Cybernetics, 31(2):227–234, 2001.
- 26 F. Herrera, J.L. Verdegay,** Linguistic Assessments in group Decision, *Proc. of the First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies*, Aachen, 941–948 (1993).
- 27 M. Delgado, J.L. Verdegay, and M.A. Vila.** Linguistic decision making models. *International Journal of Intelligent Systems*, 1993
- 28 [15] G. Norris, J.R. Hurley, and et al.** *E-Business and ERP*. Transforming the Enterprise. John Wiley & Sons Inc., 2000.
- 29 M.G. Shields.** *E-Business and ERP. Rapid Implementation and Project Planning*. John Wiley & Sons Inc., 2001.
- 30 P. Maestre.** Business intelligence: delerp y kim, al asp y crm. In *I Observatorio Dintel*, Madrid, 2002.
- 31 L. B. Investigación y comunicación, en C. Fernández-Collado y Danhke G. L.,** La comunicación humana: ciencia social, México, McGraw-Hill, 1989.
- 32 1000Minds, when good decisions matter. [En línea].** Disponible en: <http://www.1000minds.com>.
- 33 P. Korhonen & R. Tainio & J. Wallenius.** "Value Efficiency Analysis of Academic Research" Working Papers ir98032, International Institute for Applied Systems Analysis., 1998.
- 34 F. Herrera, E. Herrera-Viedma, L. Martínez, and P.J. Sánchez.** A linguistic decision process for evaluating the installation of an ERP system. In *9th International Conference on Fuzzy Theory and Technology*, pages 164–167, Cary (North Carolina) USA, 2003.
- 35 Caballero, Rafael, y Carlos Romero.** «Teoría de la Decisión Multicriterio: Un Ejemplo de Revolución Científica Kuhniana.» *Artículos de Investigación Operativa*.
- 36 Fernández Barberis, Gabriela, y M^a del Carmen Escribano Ródenas.** «La Ayuda a la Decisión Multicriterio: orígenes, evolución y situación actual.» Madrid.
- 37 Barba-Romero, Sergio, y Jean-Charles Pomerol.** «Decisiones Multicriterio. Fundamen-

tos Teóricos y Utilización Práctica”. Madrid: Servicio de publicaciones de la U.A.H., 1997.

38 International Society on Multiple Criteria Decision Making. [En línea]. Disponible en: <http://www.mcdmsociety.org/>.

39 F. Estrella, M. Espinilla, L. Martinez. “Flintstones: Una Suite Para La Toma De Decisiones Lingüísticas Basada En 2-Tupla Lingüísticas Y Extensiones. 2014.

40 FuzzyLINGuisTicDeciSionTOolseNhace-mEnt Suite – FLINTSTONES. [En línea]. Disponible en: <http://serezade.ujaen.es/flintstones/>

41 Fundamentos Teóricos y Aplicación Práctica de la Toma de Decisiones en el Deporte, Federación Extremeña de Balonmano, España. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86514954004>

42 Revista Científica de las Ciencias Médicas en Cienfuegos, Luis Alberto Corona Martinez, Mercedes Fonseca Hernández. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1727-897X2009000500004&script=sci_arttext#author1

Ricardo Corbinaud Pérez

Universidad Tecnológica de Chile
ricardo.corbinaud@utem.cl

Nicolás Gárate González

Universidad Tecnológica de Chile
nicolasgarateg@gmail.com

RESOLUCIÓN Y ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE BÚSQUEDA DE CAMINOS MÍNIMOS MEDIANTE ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS

RESUMEN

Este paper aborda el problema de búsqueda de caminos mínimos entre dos puntos. Este tipo de problema es considerado como NP (No Polinomial), es decir no es resuelto efectivamente por algoritmos exactos. Y es en virtud de esto que se proponen alternativas entregadas por la inteligencia artificial para resolverlo. Particularmente en este documento se utiliza la metaheurística.

Mediante el método científico se utilizan dos técnicas metaheurísticas para resolver problemas de ruta mínima entre dos puntos en el plano XY con obstáculos: el “Algoritmo A*” y el “Algoritmo Colonización de Hormigas”. El primero consta de una función heurística que es evaluada a cada instante y que entrega el siguiente paso a seguir de menor costo. El algoritmo “Colonización de Hormigas” está basado en el comportamiento de las hormigas que a través de las feromonas establecen un camino a seguir en busca del alimento.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio teórico y numérico, tendiente a evaluar el

desempeño de las técnicas descritas anteriormente cuando son aplicadas a la resolución de problemas de búsqueda de caminos mínimos, y con base en los resultados concluir cuál de las técnicas expuestas es más recomendable utilizar para este tipo de problemas.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de Las Ciencias de la Computación existe una línea de investigación que abarca una serie de problemas complejos que hasta el día de hoy se encuentran sin tener una solución óptima, o dicho en términos computacionales, no poseen un algoritmo óptimo para resolver dicho problema. El hecho de poseer un algoritmo óptimo significa que no existe aún ningún otro algoritmo que para el problema en cuestión vaya a entregar una solución mejor a la encontrada por el primero.

Dentro de los problemas computacionales complejos mencionados anteriormente, están los que involucran optimización y/o combinatoria. Primero, porque la combinatoria en sí ya es un problema difícil de resolver (Roa Guzmán,

2000); y segundo, porque suelen acompañarse de factores específicos que restringen las soluciones. Es interesante notar que para un problema sin solución óptima existe una variedad de soluciones cercanas a lo óptimo que pueden ser calculadas por algoritmos ya existentes, como los metaheurísticos. Se dice que un algoritmo es metaheurístico cuando la solución no se determina en forma directa, sino mediante una estrategia maestra que guía y modifica otras heurísticas para producir soluciones más allá de las que se generan normalmente en una búsqueda de óptimos locales (Dorigo & Stützle, 2004).

El propósito de la investigación es realizar una implementación y comparación de dos algoritmos metaheurísticos: A* y ACO (Ant Colony Optimization). Ambos son aplicados a problemas de búsqueda de caminos mínimos y los resultados obtenidos son medidos cuantitativamente para ser analizados con el fin de determinar cuál presenta un mejor comportamiento en el problema planteado.

La primera parte del paper (materiales y métodos) consiste en establecer una base teórica de los algoritmos utilizados y los métodos involucrados durante el experimento, además de la especificación del problema puntual a resolver y los materiales necesarios. Con los materiales y métodos explicados en detalle, comienza la etapa de implementación y obtención de resultados para ser analizados en el punto “discusiones” del presente paper. Finalmente, con los resultados obtenidos viene todo el análisis cuantitativo sobre ellos y la comparación de ambas técnicas con el objetivo de establecer y concluir cuál de las dos entrega la mejor solución al problema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se utilizan dos métodos metaheurísticos, A* y ACO. Se en-

tiende por metaheurística una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Las metaheurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los procedimientos estadísticos (Kelly & Osman, 1996).

Algoritmo A*

El algoritmo A* (conocido también como A estrella o asterisco) es un algoritmo de búsqueda que encuentra la ruta de menor costo entre dos puntos. Este algoritmo goza de una aceptable y continua implementación gracias a su desempeño y precisión. Fue descrito por primera vez en 1968 como una extensión del algoritmo de Dijkstra (1959) por Peter Hart, Nils Nilsson y Bertran Raphael, que expusieron que el A* lograba un mejor desempeño con respecto al tiempo usando heurísticas (Valenzuela, 2011).

Usa una función heurística para determinar el orden en que la búsqueda visita nodos en el árbol. La mencionada función es la suma de otras dos funciones: una función que indica el costo del camino seguido hasta un cierto nodo (denotada $g(x)$) y una estimación admisible de la distancia hasta la meta ($h'(x)$). La función de evaluación resulta entonces la ecuación (1):

$$f'(x) = g(x) + h'(x) \quad (1)$$

Empezando en un nodo inicial dado, el algoritmo expande el nodo con el menor valor de $f'(x)$. A* mantiene un conjunto de soluciones parciales almacenadas en una cola de prioridad. La prioridad asignada a un camino x viene determinada por la función $f'(x)$. El proceso continúa hasta que una meta tiene un valor $f'(x)$ menor que cualquier otro nodo en la cola (o hasta que el árbol ha sido completamente recorrido).

Suponga a alguien que quiere ir desde el punto "A" hasta el punto "B". Asuma también que un muro separa estos dos puntos tal como se muestra en la Ilustración 1. La clave para determinar qué cuadrados se usan para resolver el camino está en la ecuación (1), donde: $g(x)$ = el costo de movimiento para ir desde el punto inicial "A" a un cierto cuadro del mapa, siguiendo el camino generado para llegar allí; $h'(x)$ = el costo de movimiento estimado para ir desde ese cuadro del mapa hasta el punto "B", también conocida como la heurística. El camino se genera por ir repetidamente a través de una lista abierta y eligiendo el cuadrado con la puntuación $f'(x)$ más baja. Suponga que se tiene un costo de 1 para los movimientos horizontales y verticales, y 1,4 para los diagonales. Ahora que se tiene calculado el costo $g(x)$ mediante un camino específico hasta cierto cuadrado, la forma de resolver el costo g del cuadrado es coger el costo $g(x)$ de su padre, y luego añadirle 1 o 1,4

dependiendo de si está en diagonal u ortogonal con respecto a ese cuadro padre. El método que se usa en este trabajo para estimar el valor de $h'(x)$ es la distancia euclidiana desde un punto hacia el destino. Cabe señalar que cuando se calcula $h'(x)$, se ignora cualquier obstáculo que intervenga en el camino y es una estimación de la distancia que queda, no de la distancia actual, es por eso que se llama heurística. Al sumar $g(x)$ y $h'(x)$ se obtiene $f'(x)$. El resultado del primer paso en la búsqueda puede verse en la Ilustración 1. Las puntuaciones $f'(x)$, $g(x)$ y $h'(x)$ están escritas en cada cuadrado. De los 9 cuadros iniciales, se dejan 8 en la lista abierta después de que el cuadrado inicial fuera incluido en la lista cerrada. Se elige el valor de $f'(x)$ más bajo de todos aquellos que estén en la lista abierta. De estos, el que tiene el costo $f(x)$ más bajo es el de la derecha del cuadro inicial, con un $f(x)$ de 4. Así que se selecciona este cuadrado como el siguiente a seguir.



ILUSTRACIÓN 1 PRIMER MOVIMIENTO DE A*

Luego el cuadrado seleccionado se saca de la lista abierta y se añade a la lista cerrada. Se comprueban todos los cuadrados adyacentes, ignorando aquellos que estén en la lista cerrada o que sean intransitables, para añadir los cuadros a la lista abierta si no están ya en esa lista. Luego se hace al cuadro seleccionado el "padre" de los nuevos cuadros. Si el cuadro adyacente ya está en la lista abierta, se comprueba si el camino a

ese cuadro es mejor que el actual. En otras palabras, se comprueba que la $g(x)$ de ese cuadro es más baja que la del que se está usando para ir allí. Si no es así, no se hace nada. Por otro lado, si el costo $g(x)$ del nuevo camino es más bajo, se cambia el padre del cuadro adyacente al cuadro seleccionado. Finalmente, se recalcula f' y la g de ese cuadrado. El proceso termina cuando se encuentra el cuadro objetivo, una vez hecho

esto se va desde éste hacia atrás siguiendo los padres hasta el inicio como se muestra en la Ilustración 2

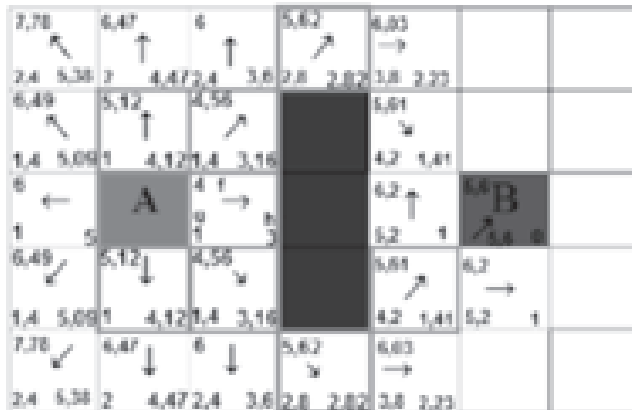


ILUSTRACIÓN 2 MOVIMIENTOS A*

Algoritmo ACO (Ant Colony Optimization)

Es un modelo inspirado en el comportamiento de colonias de hormigas reales. Estudios realizados explican cómo animales casi ciegos, como son las hormigas, son capaces de seguir la ruta más corta en su camino de ida y vuelta entre la colonia y una fuente de abastecimiento. Esto es debido a que las hormigas pueden "transmitirse información" entre ellas gracias a que cada una, al desplazarse, va dejando un rastro de una sustancia llamada feromona a lo largo del camino seguido. Así, mientras una hormiga aislada se mueve de forma esencialmente aleatoria, los "agentes" de una colonia de hormigas detectan el rastro de feromona dejado por otras hormigas y tienden a seguir dicho rastro. Éstas, a su vez, van dejando su propia feromona a lo largo del camino recorrido y, por tanto, lo hacen más atractivo, puesto que se ha reforzado el rastro de feromona. Sin embargo, la feromona también se va evaporando con el paso del tiempo provocando que el rastro de feromona sufra, por otro lado, cierto debilitamiento. En definitiva, puede decirse que el proceso se caracteriza por una retroalimentación positiva, en la que la probabilidad con la que una hormiga escoge

un camino aumenta con el número de hormigas que previamente hayan elegido el mismo camino (Barcos, Rodríguez, Álvarez, & Robusté, 2002).

Las hormigas siguen el camino cuya probabilidad sea mayor, la misma que se expresa mediante la ecuación II (Michalewicz & Fogel, 2002):

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, & \text{si } j \in N_i^k \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde P_{ij}^k es la probabilidad de que la hormiga k vaya del nodo i al nodo j ; η_{ij} es la información heurística, es decir, conocimiento previo; N_i^k es el posible vecindario de una hormiga k cuando se encuentra en la ciudad i ; τ_{ij} es el rastro de feromona; α y β son parámetros que determinan la influencia de la feromona y la heurística, respectivamente.

En la actualización de las feromonas, el nivel de ésta en los caminos prometedores aumenta y disminuye en los caminos no tan buenos. Primero, se reducen todos los valores de feromona

por medio del proceso de evaporación. Luego, se incrementa el nivel de feromona al conjunto de soluciones buenas. Se utiliza la siguiente ecuación (Michalewicz & Fogel, 2002):

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}$$

donde:

$\rho \in (0,1]$ Es el coeficiente que representa la evaporación del rastro de feromona.

$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^{NroHormigas} \Delta^k \tau_{ij}$. Es la acumulación de rastro, proporcional a la calidad de las soluciones.

$$\Delta^k \tau_{ij} = \begin{cases} 1/L_k & , \text{ si la hormiga } k \text{ utilizó la arista } i, j \text{ en su recorrido} \\ 0 & , \text{ en otro caso} \end{cases}$$

Representación

Una representación bidimensional (matricial) es el modelo computacional que se utiliza con dimensiones 10, 50, 100, 250 y 500 nodos de ancho y alto, con un nivel de obstáculos del 30% del total de nodos del mapa. Es decir, para el mapa de 10 x 10 se tienen 30 nodos obstáculos con el cuidado de que el borde superior y derecho del mapa queden despejados de manera que a lo menos exista un camino entre el origen y destino y evitar así mapas sin rutas exitosas. El origen de la ruta será el nodo ubicado en (0,0) y el destino el ubicado en el otro extremo del mapa, como se muestra en la Ilustración 3.

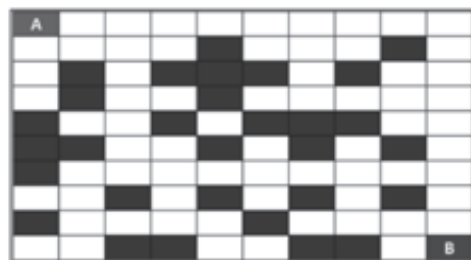


ILUSTRACIÓN 3 MAPA DE DIMENSIÓN 10 CON 30% DE OBSTÁCULOS

¹ Cantidad de hormigas, nivel de evaporación de feromonas, etc.

La localización de los obstáculos al interior de cada mapa se realiza de forma aleatoria, con la condición de que no sean el nodo inicio, fin ni los del borde superior y derecho como se explicó en el párrafo anterior. Además, los movimientos al interior del mapa tienen los siguientes valores:

Ortogonales: 1 unidad

Diagonales: 1,4142 unidades

La importancia de esto último radica en que la distancia recorrida de cada algoritmo se obtiene de la suma de los movimientos realizados al interior del mapa.

Pasando a las implementaciones de los algoritmos y el problema, se utiliza el lenguaje de programación C++ en Dev C++ para trabajar bajo la plataforma Windows 7 en un Notebook Sony VAIO con procesador Intel i3 de 2.3 GHz y 4 GB de memoria RAM.

RESULTADOS

En este punto se exhiben los resultados obtenidos para cada tamaño de mapa con cada algoritmo. Es importante mencionar que en el algoritmo ACO, al poseer este parámetros de regulación¹, se utilizan variaciones con el fin de encontrar una combinación que presente resultados aceptables. Por su parte, el algoritmo A* es una única versión. Se miden las siguientes variables: unidades de distancia recorrida, tiempo de ejecución y espacio de trabajo.

Algoritmo A*

La Tabla 1 muestra en su columna izquierda el tamaño (dimensión) de los distintos mapas utilizados, y en la columna derecha la distancia recorrida desde el origen al destino.

Tamaño Mapa	Unidades Recorridas
10	15,071
50	72,811
100	150,55
250	374,4
500	747,87

TABLA 1 RESULTADOS DISTANCIA RECORRIDA A*

La Tabla 2 representa los resultados obtenidos del tiempo de ejecución de algoritmo para cada mapa, la columna izquierda entrega el tamaño del mapa utilizado y la derecha el tiempo de ejecución que tardó el algoritmo en encontrar el camino hacia el destino.

Tamaño Mapa	Tiempo ejecución (S)
10	0
50	0,01
100	0,237
250	2,196
500	17,803

TABLA 2 RESULTADOS TIEMPO DE EJECUCIÓN A*

Por último, la Tabla 3 presenta el espacio de trabajo utilizado durante la ejecución del algoritmo A* para cada mapa.

Tamaño Mapa	Espacio Trabajo (KB)
10	2068
50	2116
100	2352
250	3884
500	7876

TABLA 3 RESULTADOS ESPACIO DE TRABAJO A*

Algoritmo ACO

Las primeras pruebas para este algoritmo se realizan con los siguientes valores:

Exploradoras: 10 y 50.

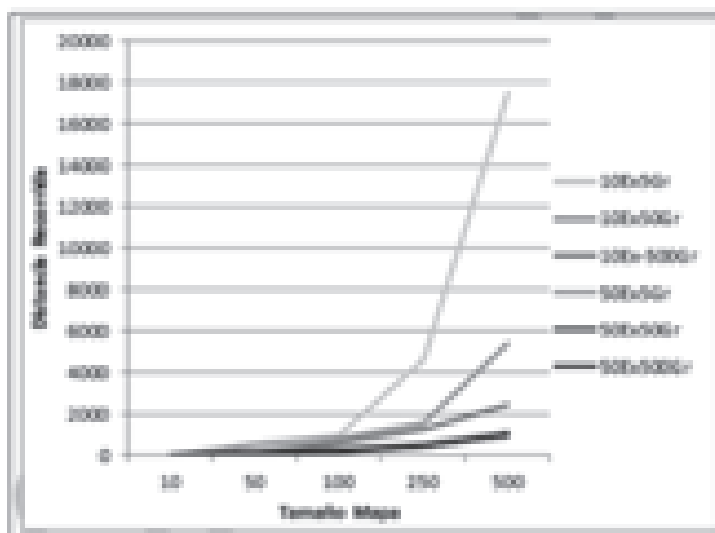
Repeticiones: 5, 50 y 500.

α : 1

β : 1

Evaporación feromona: 0,1

Y se obtienen los resultados expuestos en el gráfico de la Ilustración 4



ILUSTRACION 4 COMPARACION DISTANCIA RECORRIDA ACO 10 V/S 50 EXPLORADORAS

En vista de que la calidad de las soluciones (distancia recorrida) que entregan las 50 exploradoras es mejor que las de 10, se utilizan en un nuevo experimento 50 exploradoras pero con tasas de evaporación iguales a 10, 40 y 70%, con $\alpha=1$, 5 y 10, 50 y 500 repeticiones. Así se obtienen los resultados del gráfico de la Ilustración 5:

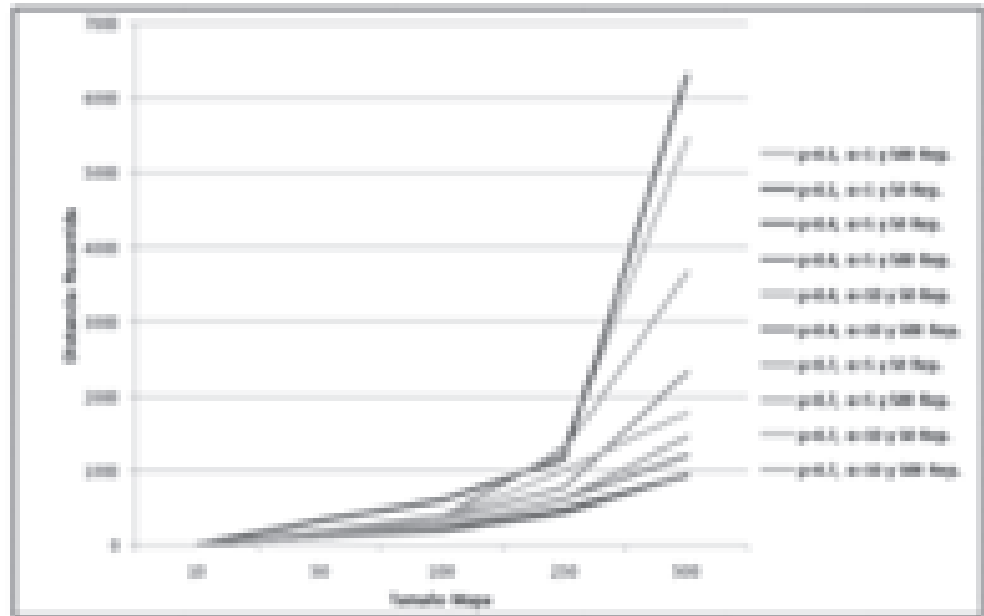


ILUSTRACIÓN 5 COMPARACIÓN VARIACIONES DE ALGORITMO ACO

Comparación A*-ACO

De todas las versiones del algoritmo ACO utilizadas, la que presenta mejores resultados es aquella que tiene tasa de evaporación del 40% con $\alpha=5$ y 500 repeticiones. Las distancias recorridas de esta versión son comparadas con las del algoritmo A* y las ilustraciones 6, 7 y 8 representan los gráficos de comparación:

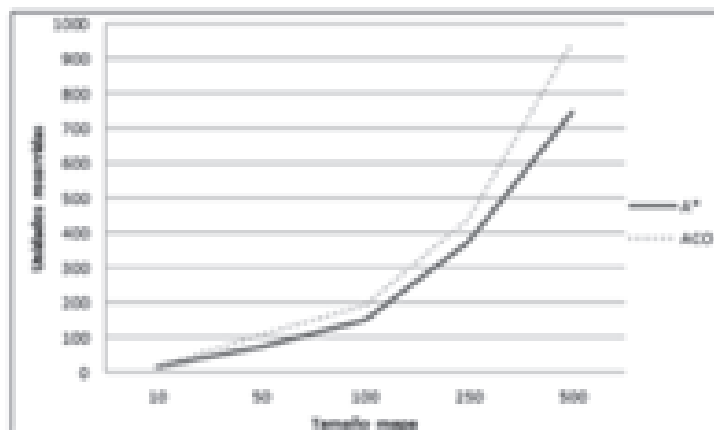


ILUSTRACIÓN 6 GRÁFICO FINAL
DISTANCIA RECORRIDA ACO
V/S A*

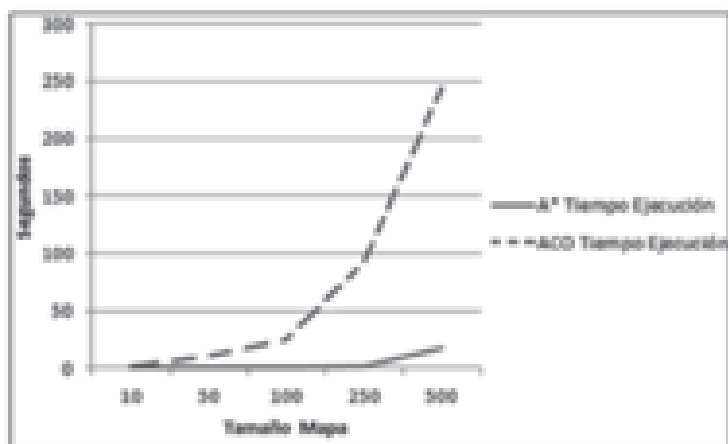


ILUSTRACIÓN 7 GRÁFICO FINAL
TIEMPO DE EJECUCIÓN ACO
V/S A*

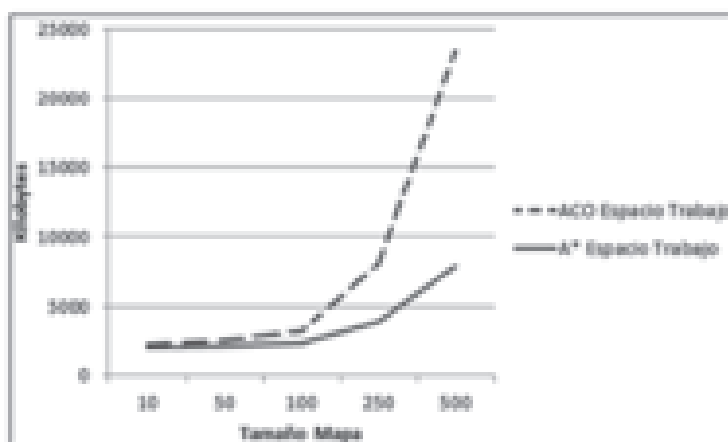


ILUSTRACIÓN 8 GRÁFICO FINAL
ESPACIO DE TRABAJO ACO V/S A*

DISCUSIONES

Una interrogante que surge luego de ejecutar el algoritmo ACO con 10 y 50 exploradoras es si realmente existe alguna diferencia entre ellos o entregan resultados similares. Para clarificar esto, se utiliza la Ilustración 4 en la cual se muestra que las 50 exploradoras descubren caminos de menor distancia en comparación a las 10, tanto para las 5 y 50 como para las 500 repeticiones. Al realizar la comparación de todas las variaciones del ACO se obtiene un gráfico como el representado en la Ilustración 5, en el

que la variación que presenta mejores resultados es la que tiene una tasa de evaporación del 40% con $\alpha=5$ y 500 repeticiones. Las distancias recorridas de esta versión son comparadas con las del algoritmo A* y las Ilustraciones 6, 7 y 8 representan los gráficos de comparación en donde se clarifica la ventaja de A* sobre ACO con porcentaje de superioridad que va desde un 17,06% para el mapa de tamaño 250 hasta un 51,25% en el mapa de dimensión 50, obteniendo en promedio soluciones 29,14% más cortas que ACO. En cuanto a tiempo de ejecución, se muestra que el algoritmo A* es notablemente

más rápido que el ACO y, finalmente, la última comparación corresponde al espacio de trabajo utilizado por cada algoritmo, en donde la curva de ACO en la Ilustración 8 evidencia que ACO utiliza más memoria que A*.

El algoritmo A* de igual forma vence en los experimentos realizados al algoritmo ACO, en todas sus dimensiones, rapidez, calidad de la solución y espacio de trabajo.

No cabe duda que A* es un algoritmo meta-heurístico bastante rápido, que consume pocos recursos y las soluciones obtenidas son de buena calidad, es por esto que se recomienda utilizar A* en problemas de búsqueda caminos mínimos en perjuicio de utilizar ACO.

CONCLUSIONES

La utilización de métodos de búsqueda meta-heurísticos, en particular ACO, no presenta mejores resultados en comparación al Algoritmo A*, pero no obstante esto último se aprecia una mejora en los resultados de ACO al calibrar los valores de los parámetros del algoritmo, presentando resultados cercanos al algoritmo A* cuando aumentan la importancia del nivel de feromonas y el coeficiente de evaporación. Esto significa que mientras más rápida sea la evaporación del rastro de feromona existente en el mapa y la importancia que se le asigna a este mismo, los resultados debiesen mejorar en comparación a tasas de evaporaciones bajas y lentas.

Ahora bien, se ha dicho que ACO presenta soluciones de baja calidad y lentas en relación a A*, pero existe una versión de ACO que es más rápida que A*. Aunque la calidad de las soluciones no es buena, se destaca dicha rapidez si el contexto del problema involucra encontrar soluciones en poco tiempo, independientemente de la calidad de la solución, como por ejemplo en situaciones críticas como la movilización de algún vehículo de emergencia, aunque habrá que evaluar si es mejor obtener una solución no suficientemente buena en un tiempo de espera bajo o esperar un poco más y obtener una solución mejor.

REFERENCIAS

Barcos, L., Rodríguez, V., Álvarez, M. J., & Robusté, F. (2002). Algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas para la resolución del problema del transporte de carga desde varios orígenes a varios destinos. Santander, España.

Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). Ant Colony Optimization. Massachusetts, Estado Unidos.

Kelly, J., & Osman, I. (1996). Meta-Heuristics: Theory & Applications. Massachusetts, Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers.

Michalewicz, Z., & Fogel, D. B. (2002). How to Solve It: Modern Heuristics. Berlín, Alemania: Springer.

Roa Guzmán, R. (2000). Razonamiento combinatorio en estudiantes con preparación matemática avanzada. Granada, España.

Valenzuela, R. (2011). Algoritmo A-star (asterisco). Nogales, México.

Arturo Otto Villa

Departamento de Electricidad
Universidad Tecnológica Metropolitana
aotto@utem.cl

SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESTÁTICA PARA GENERADORES SINCRÓNICOS

RESUMEN

En este trabajo se presentan algunas recomendaciones para ser consideradas en la elaboración de las especificaciones técnicas de adquisición de sistemas de excitación estática asociados a generadores sincrónicos de eje vertical de potencias medias y superiores.

Además, se entregan recomendaciones a especialistas responsables de realizar una supervisión de pruebas en fábrica y de puesta en servicio de estos equipos.

1.- INTRODUCCIÓN

En el Sistema Interconectado nacional (SIC, SING y otros) se utilizan, principalmente en las centrales eléctricas, generadores que son del tipo “sincrónico” que requieren de un sistema de excitación. Por otra parte, los generadores del tipo “asincrónico” se utilizan en algunos casos en las centrales de generación eólicas y no requieren de un sistema de excitación.

El presente trabajo se refiere a los generadores sincrónicos de eje vertical que requieren de un sistema de excitación cuya función, entre otras, es la de alimentar con corriente continua el bobinado de campo y, además, regular la tensión en bornes del generador, tanto en régimen permanente como en régimen transiente.

Existen básicamente tres tipos de sistemas de excitación conocidos en el mercado:

- Sistema de excitación rotatorio (generador de corriente continua acoplado al eje del generador).
- Sistema tipo libre de escobillas (“Brush less”).
- Sistema de excitación estático con puentes de tiristores (full bridge) y anillos rosantes.

Los sistemas de excitación utilizados en la actualidad son el tipo “estático” y el tipo “brushless” (libre de escobillas).

Respecto a los tres sistemas mencionados, cabe destacar que el sistema de excitación tipo rota-

torio prácticamente ya no se fabrica porque es una tecnología que está en obsolescencia, por este motivo este tipo de sistema de excitación no se incluye en este trabajo.

El sistema “Brush less” se utiliza generalmente en generadores de eje horizontal y de alta velocidad de rotación (rpm), y no en máquinas de eje vertical que son normalmente más lentas.

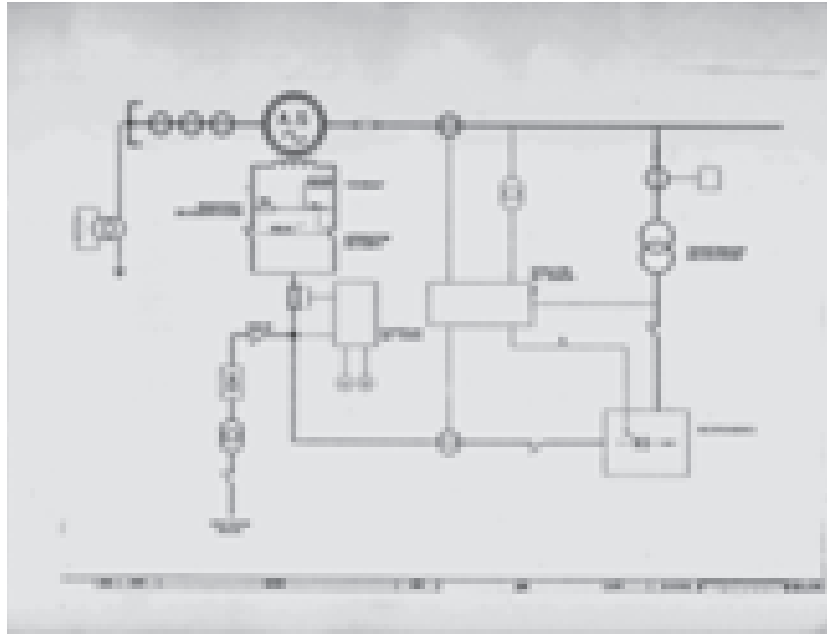
El presente trabajo se refiere solamente a generadores sincrónicos de eje vertical con sistemas de excitación del tipo estático. No se incluye el sistema “brushless” por considerarse motivo suficiente para un trabajo aparte.

2.- FUNCIONES Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO

Las funciones del sistema estático son las siguientes:

- Suministrar corriente continua variable entre 0 a 110% de I_{exc} al campo y tener capacidad de sobrecarga momentánea.
- Controlar la tensión de generación con exactitud entre un 90% a 110% de V_n .
- Garantizar una operación estable con la red.
- Mantener al generador dentro de los valores permitidos para operación (P-Q).
- Contribuir a la estabilidad transitoria en caso de falla (cortocircuito).
- Comunicar información al control SCADA.

En el esquema 1 se puede observar un diagrama unilineal típico que muestra la interconexión de los componentes mayores correspondientes a un sistema de excitación del tipo estático. El sistema funciona en “lazo cerrado” con control normalmente del tipo PID.



ESQUEMA N°1 UNILINEAL DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO.

Estos componentes o equipos están montados en celdas metálicas y son básicamente los siguientes:

puentes de tiristores (full bridge), equipos del Sistema de Excitación Inicial, regulador automático de voltaje, protecciones, control y medidas, sistema de desexcitación y “crow bar”, interruptor de campo y resistencia de desexcitación.

Además, forman parte del sistema de excitación los siguientes componentes ubicados fuera de las celdas metálicas de excitación: anillos rosantes y carbones para paso de corriente continua, caja de inversión de polaridad, transformador de excitación y celda de protección.

Todo el sistema de excitación es controlado mediante un software de aplicación, cuya licencia pertenece al fabricante de estos equipos.

3.- RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Es necesario comprender básicamente las características técnicas y el funcionamiento de un sistema de excitación estático para entender las recomendaciones técnicas que se detallan en los puntos siguientes (3.1 al 3.8), que son:

- Celdas metálicas del sistema de excitación estática.
- Celdas puentes de tiristores
- Sistema de excitación inicial.
- Sistema regulador automático de voltaje, protecciones y control.
- Sistema de desexcitación.
- Sistema anillos rosantes y porta carbones y caja inversión polaridad.
- Transformador de excitación y celda de protección.
- Celda interruptor de campo y resistencia de desexcitación.

A continuación se presentan las recomendaciones que se estiman más relevantes para ser consideradas en las especificaciones de adquisición de un sistema de excitación estática, incluidas las celdas metálicas, sistemas y componentes mayores entre otros.

3.1.- Celdas metálicas del sistema de excitación estática

3.1.1- Cada generador debe estar equipado con un sistema de excitación estática montado en celdas metálicas del tipo auto soportantes, ancladas directamente al piso. Las celdas metálicas y sus componentes interiores deben cumplir con la norma de diseño antisísmico ETG 1.020, indicada en la NT de Seguridad y Calidad de Servicio de la CNE (2014).

Este sistema debe estar basado en la rectificación de corriente alterna mediante puentes de tiristores. La alimentación del sistema debe

originarse directamente en los bornes del generador a través de un transformador de excitación, tal como se muestra en el Esquema 1.

3.1.2.- De acuerdo con lo señalado en la NT de Seguridad y Calidad de Servicio de la CNE (2014), el factor techo (K) del sistema de excitación debe ser igual a 2 o mayor. El factor techo define a la tensión techo (V_t) y a la corriente techo (I_t).

$$V_t = K V_{exo} \quad (1)$$

$$I_t = V_t / R_c \quad (2)$$

Donde:

V_{exo} = Tensión de excitación en vacío

R_c = Resistencia de campo (ohm)

El factor K es una característica importante del sistema porque asegura la estabilidad del generador frente a fenómenos transitorios.

Todos los componentes mayores del sistema de excitación deben estar diseñados para cumplir satisfactoriamente con el factor K especificado.

3.1.3.- Las características técnicas de los componentes mayores deben ser por lo menos un 10% mayores que las corrientes y tensiones requeridas al trabajar el generador con potencia nominal. Esto aplica al transformador de excitación, barrajes y cableados. Lo anterior debido al fuerte contenido de armónicas que producen los puentes de tiristores (carga no lineal).

3.1.4.- Las exigencias y características comunes de las celdas deben ser las siguientes.

- Cumplir con grado de protección igual o mejor que IP-42 según normas IEC.
- Cumplir con las exigencias de diseño sísmico según ETG 1.020.
- Cumplir con un recubrimiento aislante en las barras de C.A y C.C. para 1.000 V.
- Cumplir con un plateado electrolítico en todas las uniones emprenadas de barras.

- Cumplir con la instrumentación necesaria (Voltmetros, ampermetros, etc.).
- Cumplir con señalética y nombres de planchuelas.
- Cumplir con normativas internacionales (IEC, IEEE...).
- Cumplir con NT de Seguridad y Calidad de Servicio (2014).
- Cumplir con nivel de ruido acústico.
- Cumplir con puestas a tierra.

3.1.5.- El sistema de excitación debe tener redundancias (n-1) y estar compuesto como mínimo por dos puentes rectificadores totalmente independientes. Esto implica que, estando la unidad funcionando a potencia nominal, solo el 50% de la capacidad de la excitación debe estar utilizada, quedando un margen de un 50% como reserva inmediata (hot stand by).

Interesa que el generador se mantenga en servicio aunque falle uno de los puentes de tiristores o uno de sus tiristores.

3.2.- Celdas puentes de tiristores

3.2.1.- Los puentes rectificadores deben estar compuestos por tiristores de potencia conectados en configuración “full bridge” (2).

3.2.2.- Cada puente debe estar montado en una celda metálica independiente.

Cada puente rectificador debe estar montado en un compartimiento sellado a la propagación de eventuales arcos eléctricos y a la propagación del fuego.

3.2.3.- Se preferirá una ejecución con tres puentes de tiristores de tal forma que si uno de ellos falla los otros dos puentes sean capaces de entregar la corriente de excitación para potencia nominal del generador, sin sobrepasar sus límites térmicos.

Interesa privilegiar que la unidad de generación (grupo turbina/generador) no salga de servicio por falla de un tiristor objeto para no perder generación, ya que el costo por pérdida de generación resulta siempre alto, más aún si el tiempo de recuperación del equipo fallado es prolongado.

3.2.4.- En caso que los puentes de tiristores tengan ventilación forzada de aire, entonces deben tener un ventilador de respaldo.

3.2.5.- Los puentes de tiristores deben tener como mínimo el siguiente monitoreo:

- Monitoreo y alarma por falla de tiristor.
- Monitoreo de desbalances de corriente por ramas.
- Monitoreo temperatura de trabajo tiristores (detectada en el disipador de calor).

3.2.6.- El dimensionamiento de los elementos semiconductores debe ser un 20% mayor al valor nominal de corriente y voltaje determinado según memoria de cálculo.

3.2.7.- Cada elemento semiconductor debe estar protegido con fusibles adecuados a sus características nominales (diodos, tiristores, etc.).

3.3.- Sistema de excitación inicial

3.3.1.- El sistema de excitación inicial del generador debe alimentarse preferentemente desde un Banco de Baterías (ej: 110 Vcc) o desde una barra segura de servicios auxiliares en 380 V. Este sistema debe proporcionar inicialmente una corriente de excitación baja que permita obtener un voltaje en bornes del generador lo suficientemente alto como para energizar el transformador de excitación y los puentes de tiristores respectivos, todo bajo el control del AVR (Automatic Voltaje Regulador).

3.3.2.- La excitación inicial debe estar diseñada para que el generador llegue a generar en bornes una tensión entre un 10% a un 20% de su tensión nominal, en un lapso de 15 segundos o menor. La conexión y desconexión del sistema de excitación inicial debe ser en forma automática. A este sistema se le conoce como “Field Flashing”.

3.4.- Regulador automático de voltaje, protecciones y control

3.4.1.- El sistema de excitación de cada generador debe incluir un Regulador Automático de Tensión. El regulador debe ser del tipo digital y preferentemente del tipo PID. Se le conoce como AVR (Automatic Voltaje Regulador).

3.4.2.- Debe tener facilidades para verificar su correcto funcionamiento y sus ajustes.

3.4.3.- Se debe alimentar desde un transformador de potencial (tensión en bornes del generador) y desde un transformador de corriente (corriente de línea del generador) con valores nominales, según características del generador.

3.4.4.- El regulador debe tener un canal manual y uno automático, ambos independientes. El canal manual debe regular entre 0-110% del voltaje nominal y su aplicación es para puestas en servicio, mantenimiento y como respaldo del modo automático. El canal o modo automático debe regular el voltaje de generación conforme a un ajuste (setting) en una banda de un 90% a 110% del voltaje nominal.

3.4.5.- El AVR debe tener un interruptor de transferencia manual-automático y un indicador de concordancia de posiciones.

3.4.6.- En caso de falla del canal automático se debe producir una transferencia de la regulación automática a manual, con señalización de falla.

3.4.7.- El sistema de transferencia debe tener un dispositivo “Follow up” o “Balance Meter”, con el objeto de prevenir y evitar saltos bruscos de tensión.

3.4.8.- El AVR debe tener medios para regular la tensión en bornes del generador con elementos para operación en paralelo de dos o más generadores. Debe tener una compensación ajustable de operación en paralelo que asegure una repartición definida de la carga reactiva entre los generadores cuando las unidades generadoras, con sus respectivos reguladores, estén conectadas en paralelo. Cada generador debe tener un AVR. En algunos proyectos se recomienda tener un AVR de respaldo por máquina.

3.4.9.- El AVR debe asegurar una operación estable cuando, debido a un rechazo de carga repentino, el generador es sometido a una brusca variación de carga desde potencia nominal a cero.

3.4.10.- Además, el AVR debe limitar la sobretensión en bornes del generador a un valor no mayor que un 15% (Over shoot).

3.4.11.- El AVR debe poder forzar la tensión de excitación como contra-excitación negativa rápida durante una perturbación de la red, variaciones repentinas de carga, cortocircuitos y otras condiciones anormales del sistema.

3.4.12.- El sistema de excitación en coordinación con el regulador de velocidad de la turbina y el AVR debe incluir un dispositivo PSS (Power System Stabilizer). Este dispositivo debe amortiguar las eventuales oscilaciones de potencia activa (penduleos de potencia) originados por tomas de carga o variaciones de carga en el sistema, y estabilizar la potencia generada en el tiempo más breve posible.

3.5.- Sistema de desexcitación

3.5.1.- En caso de fallas internas del generador o de detención de emergencia de la Unidad de Generación (turbina/generador), la desexcitación del generador debe ser lo más rápida posible, para esto debe abrir el interruptor de campo y evitar así la circulación de corriente por el enrollado de campo.

El tiempo para desexcitar el generador desde tensión nominal hasta tensión remanente (5% de la tensión nominal) no debe exceder los 5 segundos.

3.5.2.- Durante la desexcitación, la máxima tensión inducida en el enrollado de campo debe permanecer por debajo de la tensión de prueba, con un margen de seguridad de un 25%.

3.5.3.- El circuito de desexcitación debe incluir una resistencia de descarga ajustable (taps). El ajuste debe permitir modificar el tiempo de desexcitación, esto implica modificar el valor de la constante de tiempo R/L (campo). La resistencia debe diseñarse con un margen de seguridad de un 25%.

Se puede especificar una resistencia de descarga del tipo no lineal, con el objeto de acortar y optimizar los tiempos de desexcitación. Estas resistencias son de mayor costo que las convencionales.

En la figura 2 se muestra una curva típica de desexcitación, (1), (4):

3.6.- Anillos rozantes y porta carbones y caja de inversión de polaridad

Los anillos rozantes y el sistema porta escobillas con carbones se encuentran ubicados en el domo del generador y tienen por objeto conducir la corriente de excitación hasta el bobinado de

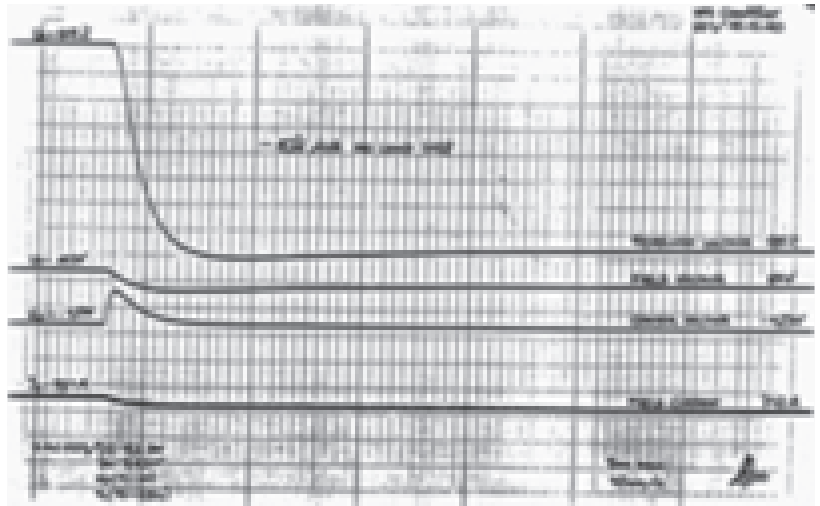


FIGURA 2 CURVA DESEXCITACIÓN.

campo del generador (polos), ubicado en el rotor, que es la parte rotatoria de la máquina.

La caja de inversión de polaridad de los anillos rozantes va normalmente ubicada a la salida de la corriente continua de las celdas de excitación o próxima al foso del generador, y permite uniformar el desgaste de los anillos, realizando una inversión de polaridad de los anillos cada 8 a 10 meses.

Los anillos rozantes del campo deben cumplir los siguientes requisitos:

3.6.1.- Permitir una fácil inspección.

3.6.2.- Permitir un fácil recambio de carbones.

3.6.3.- Deben poseer estrías que permitan un mejor enfriamiento de los anillos.

3.6.4.- El porta escobillas debe permitir mantener una presión constante de apriete (roce) de la escobilla dentro de los límites de uso que el fabricante recomiende. Interesa que el desgaste de carbones sea el mínimo.

3.6.5.- La elevación de temperatura de los anillos rozantes, trabajando a potencia nominal, no debe exceder los 75 K.

3.6.6.- El sistema debe permitir invertir periódicamente la polaridad de los anillos rozantes, de manera que su desgaste sea uniforme en el tiempo. Esto se logra incluyendo en el sistema de excitación una caja de inversión de polaridad, diseñada en base a “puentes” (links) o un switch selector de polaridad.

Se recomienda ubicar esta caja a la salida de CC, entre las celdas de excitación y el foso del generador.

3.7.- Transformador de excitación y celda de protección

3.7.1.- El transformador de excitación debe ser del tipo seco encapsulado clase H (6) montado en el interior de una celda metálica con grado de protección IP-33 según normas IEC (6), separada de las celdas del sistema de excitación.

3.7.2.- La elevación de temperatura media de los enrollados no debe exceder los 80K (6).

3.7.3.- El transformador debe ser del tipo rectificador y debe considerar una mayor potencia de un 10% por contenido de armónicas originadas por una carga no lineal (puente de tiristores).

3.7.4.- El transformador debe incluir un sistema de medición y monitoreo de temperatura de sus enrollados con posibilidad de dar alarma por sobre temperatura y dar una orden posterior de desconexión del transformador por alta temperatura de operación.

3.7.5.- El transformador y la celda metálica debe cumplir con la ETG 1.020 de diseño sísmico.

3.7.6.- Se recomienda especificar un grupo vectorial delta/estrella para evitar la circulación

de las corrientes armónicas hacia el sistema.

3.7.7.- Se debe especificar un factor techo (2 a 4) para ser tomado en cuenta en el diseño del transformador. A mayor factor techo, mayor es la potencia nominal requerida por el transformador. Se debe exigir la entrega de una memoria de cálculo de dimensionamiento del transformador de excitación (potencia nominal y tensión secundaria). El valor de la tensión primaria la fija el voltaje de generación.

La determinación de la potencia nominal del transformador (P_n) depende, entre otros factores, del valor (K), tal como se muestra en la siguiente expresión de cálculo:

$$P_n = 3 \cdot (K \cdot V_{exo}) \cdot I_{ex} \cdot F_v \cdot F_i \cdot K_s \cdot K_p \cdot 10^{-3} \text{ kVA}$$

(4)

Donde:

- a) P_n = Potencia nominal kVA
- b) I_{ex} = Corriente de excitación máxima permanente (Acc).
- c) K = Factor techo.
- d) V_{exo} = Tensión de excitación en vacío (V_{cc}).
- e) V_t = Tensión Techo = $K \times V_{exo}$. (V_{cc})
- f) F_v = Factor conversión voltaje puente CC/CA (full bridge alfa 60°) = 0,85
- g) F_i = Factor conversión corrientes puente CC/CA (full bridge alfa 60°) = 0,47
- h) K_p = Factor de pérdidas en puentes, ($^\circ/1$).
- i) K_s = Factor de sobredimensionamiento del transformador por armónicas (10%).

3.8.- Celda interruptor de campo y resistencia de desexcitación

3.8.1.- El interruptor de campo debe ser adecuado para operar en corriente continua e interrumpir sin daños en sus contactos la corriente de desexcitación del generador.

3.8.2.- El interruptor debe interrumpir mediante un juego de contactos principales la corriente de desexcitación abriendo el polo positivo y el polo negativo y, además, debe poseer un contacto en oposición a los principales para conectar la resistencia de descarga R_c y permitir la descarga de energía del campo a través de R_c .

3.8.3.- El traslapo entre los contactos principales y el de conexión de la resistencia de descarga debe ser de 1 a 2 ms como máximo.

3.8.4.- La resistencia de descarga deberá tener tomas (taps) para modificar la constante de tiempo R/L (curva de desexcitación).

3.8.5.- El diseño del interruptor de campo es de aplicación específica para sistemas de excitación. Su diseño es muy diferente al de un interruptor de baja tensión convencional, por lo que se deben aplicar normativas particulares de interruptores de campo en corriente continua.

3.8.6.- Cabe señalar que existen fabricantes que ofrecen interruptores de campo instalados en el lado de corriente alterna. Para este caso, se incluye el diseño de una electrónica de potencia que permite desexcitar el generador en forma rápida y descargar la energía del campo a través de un circuito compuesto por semiconductores (multi pulse generator, thyristor switch, discharge resistor). El puente de rectificador (tiristores) se encuentra electrónicamente enclavado con el interruptor CA. La ventaja de este sistema es que no se requiere de un traslapo mecánico de 1 a 2 ms para descargar el campo vía R_c , (el ajuste es electrónico).

4.- Pruebas recomendadas para el sistema de excitación

En este punto, se mencionan las pruebas que se recomienda especificar y realizar en un sistema de excitación del tipo estático.

Se debe diferenciar entre pruebas en fábrica (FAT) y Pruebas en Sitio (SAT), donde:

FAT= Factory Assembled Tests.

SAT= Site Assembled Tests.

En ambos casos, se debe exigir la entrega de un plan de pruebas en fábrica y un plan de pruebas en sitio.

Durante el desarrollo de las pruebas FAT, se debe simular el comportamiento del bobinado de campo del generador mediante una carga resistiva, esto para verificar el aspecto funcional del sistema. Cabe recordarse que normalmente el fabricante del sistema de excitación es diferente al fabricante del generador, por lo que los equipos se fabrican en lugares diferentes y distantes y las pruebas FAT se realizan en cada fábrica de origen. Por este motivo, no se tiene el generador disponible como para probarlo con el sistema de excitación en fábrica.

Además, en fábrica se realizan las pruebas de tensión aplicada a 50 Hz durante un minuto a los componentes primarios (prueba Hipot).

Durante las pruebas SAT, se prueba inicialmente el sistema de excitación en forma separada del generador (pruebas en seco) y posteriormente se conecta al sistema de excitación el bobinado de campo de la máquina (pruebas en giro). En el caso de las pruebas en giro de la máquina, se diferencian dos tipos de pruebas:

- Las pruebas en vacío (sin carga).
- Las pruebas con carga (generador sincronizado con la red).

A continuación se resumen las pruebas, mediciones y verificaciones que se recomiendan realizar en fábrica y/o en sitio, según corresponda, en el sistema de excitación (3):

- 4.1.-** Medida de la resistencia de aislación de las celdas.
- 4.2.-** Medida de la elevación de temperatura de cada puente en régimen de operación normal y régimen (n-1); es decir, con un puente fuera de servicio.
- 4.3.-** Verificación de la distribución de corrientes por rama de cada puente.
- 4.4.-** Verificación de operación de los tiristores en función del ángulo de disparo.
- 4.5.-** Verificación de control y ajustes del regulador automático de voltaje y respaldo.
- 4.6.-** Verificación de la transferencia automática desde el canal automático al canal manual, (circuito follow-up) y viceversa.
- 4.7.-** Verificación de protecciones:
- Límite excitación mínima (sub. excitación).
 - Límite sobre excitación.
 - Límite temperatura campo (rotor).
 - Falla a tierra.
- 4.8.-** Verificaciones operación del interruptor de campo y del tiempo de traslapo.
- 4.9.-** Verificaciones circuito crow-bar (protección de sobretension).
- 4.10.-** Verificación de sobretensiones y de los tiempos de desexcitación para distintas condiciones de rechazo de carga y toma de carga repentina:
- Primer rechazo:.....25% Pn
 - Segundo rechazo:....50% Pn
 - Tercer rechazo:.....75% Pn.
 - Cuarto rechazo:.....100% Pn.
- 4.11.-** Verificación corriente techo y voltaje techo según IEEE Std.421.2-1990 párrafo 6.3.3.
- 4.12.-** Verificación y ajustes del PSS.
- 4.13.-** Verificación operación automatismo de la redundancia del sistema de excitación y sistema ventilación aire forzado,(hot stand by).
- 4.14.-** Verificación del diagrama P-Q y curvas en vacío y cortocircuito del generador.
- 4.15.-** Medida ruido acústico de las celdas de excitación a potencia nominal.
- 4.16.-** Verificación de operación del sistema de excitación inicial (field flashing).
- 4.17.-** Verificación de la caja inversión de polaridad de los anillos rozantes (mediante “links”) o switch selector.
- 4.18.-** Verificación de la resistencia de descarga.
- 4.19.-** Verificación del software del sistema de excitación.
- 4.20.-** Verificación funcionamiento del Transformador de Excitación (elevaciones de temperatura y vibraciones).
- 4.21.-** Ajustes finales de los parámetros del sistema de excitación (ganancias, constantes de tiempo, etc.).
- 4.22.-** Verificación de los carbones y su presión de trabajo.
- 4.23.-** Inspección visual de todos los componentes y cumplimiento de diseño conforme a planos aprobados del sistema de excitación (planos “As Build”).
- 4.24.-** Verificación de las puestas a tierra.

5.- CONCLUSIONES

La adquisición de un generador sincrónico y de su equipo de excitación asociado requiere de especificaciones técnicas claras que aseguren un suministro adecuado a las normativas y las exigencias del proyecto.

Para el caso del sistema de excitación, las especificaciones deben incluir como mínimo los requerimientos técnicos para cada componente mayor y, además, se deben precisar las pruebas en fábrica y en sitio que el equipo debe cumplir, todo lo anterior con el propósito de asegurar un correcto funcionamiento de la unidad y de evitar una eventual salida de servicio originada por algún mal funcionamiento o falla de diseño de algún componente del sistema de excitación.

Los equipos deben cumplir con las normativas exigidas en la NT de Seguridad y Calidad de Servicio (2014), situación que es verificada por la autoridad nacional previamente a la conexión de la central al sistema eléctrico nacional.

[5] IEEE Std.115. Guide, Test Procedures for Synchronous Machines.

[6] IEC-60076. Power Transformers (Dry Type part).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Normas IEEE Std. 421.2-1990. Standard Criteria and Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machine.

[2] Normas ANSI C 34.2. Practice and Requirements for semiconductor Power Rectifiers –1988.

[3] Normas ANSI C 37.20. Switchgears Assemblies. 1990.

[4] IEEE Std.421. A. Guide for Identification, testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems.

Víctor H. Escobar-Jeria

Universidad Tecnológica Metropolitana

vescobar@utem.cl

María J. Martín-Bautista

Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Granada 18071 Granada, España

mbautis@decsai.ugr.es

María A. Vila

Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Granada 18071 Granada, España

vila@decsai.ugr.es

PERFIL DE USUARIO Y LÓGICA DIFUSA: MODELO DE REPRESENTACIÓN DE PERFIL DE USUARIO EN XML

RESUMEN

Existen factores importantes que han llevado a un aumento de la información, como la acumulación rápida de datos, el desarrollo de sistemas gestores de base de datos más poderosos y el constante desarrollo tecnológico en el que Internet y las bases de datos dinámicas, entre otras, pasan a ser las principales fuentes de extracción de información. En el campo del KDD, la lógica difusa puede ayudar en los problemas tales como la manipulación de asuntos relacionados con la comprensibilidad de patrones, datos ruidosos e incompletos y la interacción humana. Concretamente, este documento se centra en las aplicaciones de lógica difusa en la Minería Web que permitan mejorar y optimizar diferentes procesos de la Web.

Como en la Minería Web de Uso existen diferentes elementos que tienen cierto grado de imprecisión o de incertidumbre, la lógica difusa permite manipular esos elementos para poder representar de mejor forma la realidad. Un ejemplo significativo son los perfiles de usuario. El tratamiento de los perfiles de usuario contempla el análisis de la información, que es

registrada a partir de diversas fuentes, con el fin de obtener información sobre las preferencias y características de los usuarios. Muchas de estas preferencias o intereses tienen cierto grado de incertidumbre, por lo que la lógica difusa va a permitir modelar y manejar dicha información de una manera flexible.

Palabras clave: **Minería Web, Minería Web de Uso, Lógica Difusa, Personalización, Perfil de usuario, XML.**

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la información disponible en Internet cumple un rol muy importante en nuestra vida cotidiana, desde comprar por la Web o revisar nuestros correos electrónicos, hasta leer un simple periódico digital. Esto indica que con el tiempo ha sido más fácil obtener información, pero, a la vez, existe un gran desafío para las empresas y las organizaciones que tienen que ver con generar información de calidad, oportuna e interesante para los usuarios que navegan por la Web. Para manejar esta gran cantidad de información surge un área de estudios llamada

Minería Web. Esta área no es sólo una aplicación de técnicas de Minería de Datos para los datos de la Web, sino una adaptación de procesos más adecuados para las características de este tipo de dato, principalmente por la falta de estructura.

Cuando los usuarios navegan por el Web van dejando huellas, estas huellas permiten de alguna manera identificar a un usuario o un grupo de usuarios con similares y distintas características. La gran mayoría de la información acerca de la actividad que realizan los usuarios en la Web es almacenada en los archivos log.

Uno de los objetivos de la Minería Web de Uso es minar los archivos log del servidor web para encontrar relaciones entre usuarios acerca de los aspectos de navegación. La mayor parte de estos aspectos son conceptos intrínsecamente imprecisos o inciertos. La edad del usuario, el nivel de educación, el lenguaje, qué tan paciente es el usuario en su navegación, son los conceptos fáciles de manejar a través de técnicas como la Lógica Difusa [23].

Además, la Lógica difusa es también utilizada en aplicaciones de Minería para mejorar las capacidades de alguna de las técnicas y algoritmos [2]; dos de las más extendidas son las Reglas de Asociación Difusas [11] y el Clustering Difuso [3].

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: en el apartado dos, explicaremos brevemente los tres tipos de Minería Web: Minería Web del Contenido, Minería Web de la Estructura y Minería Web del Uso, enfocándonos principalmente en la Minería Web en el apartado tres. Para este propósito hemos estudiado el proceso de personalización en la Minería Web a través de técnicas de minería, caracterización y clustering de sesiones de usuarios con el fin de identificar a grupos sociales de usuarios. En el apartado cuatro propondremos el modelo de representación de perfiles de usuarios y veremos algunos resultados prácticos obtenidos.

Por último, en el apartado cinco veremos las conclusiones y futuros trabajos.

MINERÍA WEB

Actualmente, vivimos en un mundo tan involucrado con el Internet, que con un simple click podemos saber lo que sucede en otras partes del mundo en unos pocos segundos. Sin embargo, la situación se altera cuando queremos obtener información útil y precisa. El volumen grande de información en la Web, la diversidad de lenguajes, la calidad de información o la distribución de información en diferentes plataformas son algunas de las inconveniencias para procesar estos datos.

Por medio de las técnicas de Minería, nueva información puede ser descubierta y extraída automáticamente de documentos y servicios web [13]. Sin embargo, las técnicas de Minería tradicional no siempre son tan fáciles de aplicar en la estructura de la web. Las particularidades de esas fuentes suponen la falta de estructura y diversidad de representación, lo que determina que la etapa del preprocesamiento sea uno de los más importantes en el proceso de Minería [10], [15].

En [5] se distinguen tres formas para entender a la Minería Web, desde el punto de vista del contenido, estructura y uso. *La Minería Web del Contenido* es el descubrimiento automático de patrones de contenidos en documentos web [18], [6]; la *Minería Web de la Estructura* consiste en estudiar los enlaces de las estructuras entre o intra documentos para descubrir patrones útiles [9], [6]; y finalmente, la *Minería Web del Uso* está definido como el proceso de descubrimiento automático de patrones de accesos o uso de servicios web, basados en el comportamiento de los usuarios cuando interactúan en la Web [20].

MINERÍA WEB DEL USO

En el comercio electrónico es necesario aplicar métodos o técnicas inteligentes que permitan almacenar y analizar la información que los clientes o potenciales clientes van dejando registrada en su navegación por la Web. Por esta razón, el comportamiento del usuario y los objetivos del usuario son elementos importantes que se deben obtener. El conocimiento acerca del usuario es usado no sólo para caracterizar al usuario, sino también para descubrir tendencias genéricas para los propósitos de marketing y para la mejora del sitio Web. Estos datos acerca de los usuarios son coleccionados de la actividad del usuario en el web por medio de huellas digitales (IP, factors, cookies, etc.) que los servidores almacenan automáticamente en los accesos. Esta actividad es principalmente almacenada en los archivos log del servidor web, y es usualmente completada con otras fuentes informativas que provienen del servidor proxy, de la máquina del usuario, entre otros.

Para la explotación de diferentes tipos de datos, pueden ser usadas diferentes técnicas de descubrimiento de patrones. Estos patrones de navegación pueden evidenciar preferencias del usuario, el comportamiento del cliente en línea y futuras direcciones de mejoras del sitio Web.

La información que puede ser obtenida de estos procesos de Minería nos permitirá construir perfiles de usuario prototípicos y llevar a cabo un proceso de personalización. Obteniendo los perfiles del usuario, varias decisiones pueden ser tomadas desde el punto de vista de los contenidos y diseño para personalizar el sitio en función del usuario.

Personalización y perfil de usuario

La personalización de la Web puede ser vista desde dos puntos de vista: La empresa y el usuario.

El punto de vista de la empresa está relacionado con el marketing e identificación de clases demográficas. El punto de vista del usuario está relacionado con la obtención de información y las recomendaciones de navegación. Parte de esta información puede ser almacenada en lo que es llamado *Perfiles de Usuario* [17].

El perfil del usuario puede definirse como el conocimiento acerca de la información interesante del usuario. Se distinguen dos tipos de perfiles: los perfiles simples son representados por un grupo de condiciones extraídas de documentos estimados interesantes para ese usuario. Estas condiciones pueden usarse para expandir la consulta original, para recuperar más documentos pertinentes relacionados con lo mismo o temas similares, y los *perfiles extendidos* pueden estar descritos como un tuple de cuatro variables. Una de ellas es la *variable demográfica*, eso está relacionado a los aspectos sociales, como el rango de edad del usuario o el nivel de educación, entre otros. Otra variable es la *identificación*, que está relacionada con la información almacenada en los archivos log del servidor del Web. Luego, las variables *clickstream* que están relacionadas a los pesos de la página, donde si una página tiene un cero el valor, ésta significa que la página no ha sido visitada. La última variable está relacionada a la sesión simple de los perfiles que describimos previamente [17].

Para la obtención de estos perfiles, las técnicas del clustering y reglas de asociación son usualmente aplicadas. A través del proceso de clustering, un grupo de clientes o datos con características similares es inicialmente obtenido sin tener una clasificación previa, se trata de un proceso automático. Los perfiles de usuario derivados de estos grupos pueden ser utilizados para guiar estrategias de marketing según los grupos [21]. Las reglas de asociación descubren relaciones y correlaciones entre artículos en las que la presencia de un artículo o un grupo de

ellas en una transacción implica con un grado de confianza la presencia de otros artículos [4].

El inconveniente principal del manejo de perfiles de usuario en la Web es la falta de conocimiento acerca de la identidad del usuario, idea de la que surgen dos situaciones diferentes. La primera situación tiene que ver con los usuarios sin registrar, casos en el que el perfil de usuario puede identificarse o personalizarse con un grupo social, asignando un perfil general relacionado con unas preferencias mostradas por el usuario mientras navega a través del sitio Web. La segunda situación se refiere a los usuarios registrados: si un usuario es identificado de algún modo, entonces el sitio Web puede estar hecho a la medida según las preferencias del usuario. El sistema sigue la pista al usuario de visitas previas junto con el perfil del usuario, de manera que puede usar esta información para realizar y personalizar el sitio Web.

En ambas situaciones, el previo análisis de los archivos Web log para identificar al usuario es recomendable.

Definición de sesión de usuario

Una sesión de usuario está definida por una secuencia de accesos temporales a un sitio particular de la Web por un usuario [16], [1]. Cada sesión de usuario es una representación lógica de una visita de un usuario a algún sitio Web (usualmente dentro de cierto intervalo de tiempo).

De un archivo log, un conjunto de sesiones de usuarios S puede ser definido como $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, donde cada una de las sesiones s_i está definida por un conjunto de páginas visitadas $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. Por lo tanto, la descripción de una sesión de usuario se puede ver, desde un punto de vista matemático, como una matriz sesión-página SP de dimensiones $m \times n$ (Ver ecuación (1)):

$$SP = [w(s_i, p_j)], 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (1)$$

donde $w(s_i, p_j)$ representa el peso de la página p_j en la sesión s_i . Este peso puede tomar valores binarios o puede ser una función de presencia o una función de tiempo de permanencia de la página en la sesión.

Caracterización de sesiones de usuario

De un archivo log inicial, existen varios aspectos para tener en cuenta al momento de identificar cada sesión y predecir a cuál pertenece cada usuario. La etapa de preprocesamiento del archivo log es uno de estos aspectos. El objetivo es limpiar los datos para identificar las sesiones del usuario en una forma más fácil y eficiente. Para limpiar los datos, la información poco relevante es eliminada. Entendemos como la información poco relevante las entradas de gráficos, imágenes, elementos javascript, etcétera, lo que es replicado a través de todo el archivo y generalmente forma parte de los marcos y la composición de páginas dinámicas. Una descripción más detallada de los métodos y técnicas de preprocesamiento pueden ser encontrados en [19].

Otro de los aspectos a considerar es la asociación de una sesión con un cierto usuario. Desde cada web log la entrada del archivo tiene una dirección IP, de modo que la suposición más directa tiene que ver con identificar a cada IP con un usuario diferente. Esto también se puede determinar con una cookie o con una inscripción del usuario en el sitio Web. Sin embargo, estas situaciones no siempre ocurren. La identificación del usuario no es siempre posible, ya que pueden existir casos en los que varios usuarios pueden usar la misma IP a través de un proxy para ganar acceso a un sitio Web. En estas situaciones, podemos identificar una sesión como una secuencia de accesos de la misma IP en un cierto período de tiempo de

retraso grande entre páginas o entre la primera y la última página de la sesión. El método para identificar las sesiones de usuarios es conocido como *timeout* [7] y será explicado con más detalles a continuación.

Del archivo log, una vez que hemos llevado a cabo la etapa de preprocesamiento antes explicado, las sesiones del usuario se organizarán inicialmente asumiendo que cada IP es propia de un único usuario. El siguiente paso es analizar el tiempo de espera para definir las sesiones. Por ejemplo, si una IP en un tiempo A es igual a otra IP en un tiempo B y el tiempo de retraso entre ellos es más pequeño que el intervalo de espera, entonces podemos afirmar que ambas entradas son propias de la misma sesión, de otra manera las IP forman parte de sesiones diferentes. Sin embargo, si una IP en un tiempo A y otra en un tiempo B son diferentes, entonces forman parte de sesiones diferentes, independientemente del tiempo de retraso entre sus accesos.

Formalmente podemos definir un clickstream $R=\{r_1, r_2, \dots, r_q\}$ como una secuencia de click que es registrada en los archivos log cuando el usuario navega por algún sitio Web y realiza clicks sobre imágenes, en algún link, etc. Cada uno de esos click son definidos como r_k , con $1 \leq k \leq q$. Suponiendo que todos los click provienen de una misma IP, podemos caracterizar el clickstream de la siguiente manera:

- T es el tiempo de espera calculado como la diferencia entre ambos click en el sitio Web, siendo $T=(t_{k+a} - t_k)$

- Entonces, si $T \leq \beta$, donde β es el máximo tiempo de espera, el click r_k y r_{k+1} es considerado parte de la sesión s_i . En otro caso, si $T > \beta$, entonces el click r_k es considerado como el final de la sesión s_i , mientras el click r_{k+1} es considerado el comienzo de la sesión s_{i+1} .

- Por lo tanto, la duración de la sesión puede ser calculada como:

$$\text{Session time} = \sum_{k=1}^q r_k \quad (2)$$

donde q es el número de clicks en el clickstream de la sesión.

Para tener una más amplia visión de la personalización y la Minería Web, veremos algunos trabajos previos en esta área.

Trabajos Relacionados

En la literatura podemos encontrar algunos enfoques sobre la personalización. Podemos ver una visión general de la personalización en la Web basada en la Minería Web del Uso, y se comentan herramientas y aplicaciones disponibles [12], [22].

También podemos hacer referencia al trabajo de [14] que presenta un sistema de recomendación mediante la integración de técnicas de personalización y de minería, basadas en el comportamiento de usuarios junto a estrategias de marketing aplicado a las tiendas virtuales. El desarrollo de un sistema administrativo de interacción en tiempo real, a través de la interacción de los datos históricos y patrones de uso de accesos en línea de un sitio de comercio electrónico se puede ver en [8].

La más relevante quizás sea [20], donde se presenta una visión general del proceso de personalización basado en la Minería Web del Uso. Se realizan los métodos de procesamiento, integración de datos de fuentes múltiples y las técnicas comunes de descubrimiento de patrones que se aplican a los datos de uso. El objetivo del trabajo es presentar las técnicas de descubrimiento de patrones como clustering, reglas de asociación y descubrimiento de

secuencias de patrones que son usados en el uso de la Web.

Personalización mediante perfiles de usuario con lógica difusa

La lógica difusa parte del principio de que las cosas no son blancas o negras, tal como establece la lógica clásica, sino con tonalidades y con múltiples valores, lo cual se adapta mejor al comportamiento humano.

La lógica difusa se ha convertido en una potente herramienta a la hora de modelar sentencias de lenguaje natural y razonar con las mismas, tal y como lo hace el ser humano, tipo de razonamiento que se conoce como razonamiento aproximado. La teoría de subconjuntos difusos y la lógica difusa, ambos propuestos por L.A. Zadeh [23], constituye los cimientos de la formalización de este tipo de razonamiento.

Los perfiles de usuario son importantes desde el punto de vista de la optimización de Internet y los procesos relacionados con el usuario, como la construcción de consultas, la retroalimentación pertinente del usuario y la construcción flexible de perfiles de los usuarios. La flexibilidad en la construcción de perfiles es necesaria por dos razones: la primera es facilitar el acceso y navegación en la Web, tanto para usuarios expertos como no expertos; y en segundo lugar, para tratar con las ambigüedades de las acciones de los usuarios en la Web.

El conocimiento para la creación de los perfiles lo podemos obtener de la navegación generada por el usuario, la cual está formada por varios componentes correspondientes a las variables conductistas, variables de identificación, variables clickstream y de los documentos estimados interesantes por el usuario.

Estos conceptos son difusos en sí mismos, ya que podemos aproximarnos a la edad, o al nivel

de lenguaje o podemos expresar por medio de un cuantificador lingüístico cuan paciente es el usuario. Estas características del usuario pueden ser modeladas a través de diferentes etiquetas lingüísticas, como por ejemplo: {bajo, muy bajo, regular, alto, muy alto} para determinar el nivel de habilidad del usuario para comunicarse en un lenguaje dado.

Los clicks que el usuario hace, nos indican el tiempo que una página Web es visible en el navegador de un usuario, el país de donde está conectado, y nos puede dar una idea acerca del usuario, qué tan paciente es el usuario en la navegación, la edad del usuario, el lenguaje, y así sucesivamente.

Modelo de representación de perfil de usuario

Denotaremos como E el conjunto de los perfiles extendidos. Un perfil extendido e_i pertenece a E, $1 \leq i \leq d$, siendo d el número de perfiles obtenidos, que puede ser representado en la tupla [17]:

$$e_i = (L_i, K_i, z'_i, V_i) \tag{3}$$

donde:

- $L_i = (l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}, \dots, l_{ic})$ es el conjunto de identificación de las variables de los archivos Web log acerca de la identificación del usuario, donde c es el número de variables.
- $K_i = (K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, \dots, K_{ir})$ es el conjunto de las variables de clickstreams representado por el peso asociado a cada página j disponible, $1 \leq j \leq r$, donde r es el número de variables clickstream consideradas, expresadas en base a lapsos de tiempo en la página; si la página j no es visitada, el valor de k_j es 0.
- $z'_i = \{t'_{i1}, t'_{i2}, t'_{i3}, \dots, t'_{ia}\}$ donde $z' \in Z$ (Z conjunto de perfiles de usuario), $t'_{ij} \in T$, $1 \leq j \leq a$, donde 'a' es el número de términos en el perfil y que representa una sesión del perfil simple obtenido por la misma sesión.

• $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{ib})$ representa el conjunto de variables demográficas, siendo 'b' el número de variables a considerar.

Como estas variables pueden ser precisas o imprecisas, las técnicas difusas pueden manejar estos datos con diferentes tipos de granularidades, dependiendo de la variable a modelizar.

Experimentación

El contenido de un perfil de usuario está evidentemente condicionado por los objetivos del mismo dentro de un dominio de aplicación. Es evidente que alguna información contenida en los perfiles puede ser independiente del dominio, como por ejemplo los datos personales.

Proponemos un modelo que nos permitirá la representación automática de perfiles de usuario de algún sitio Web, representado en la figura 1.

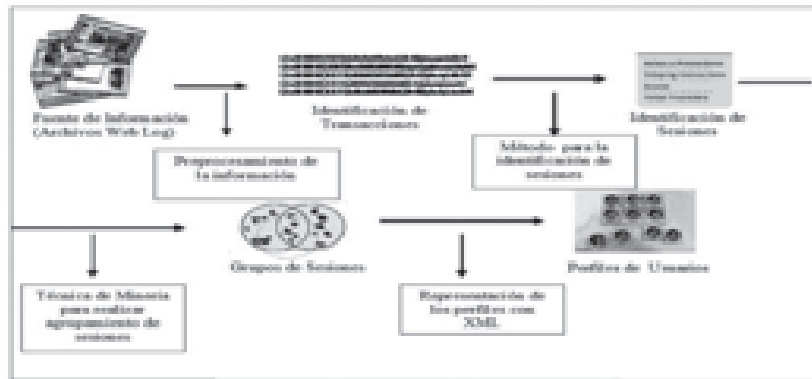


FIGURA 1 MODELO DE REPRESENTACIÓN

Este modelo nos permite analizar información de los servidores Web, siendo esta información obtenida principalmente los ficheros Log que se almacenan en los servidores a medida que los usuarios van navegando por algún sitio Web.

Dentro del análisis propiamente tal del clustering difuso y del tradicional, es importante determinar con anterioridad el número de clusters o

grupos implicados en el análisis, claro está que depende mucho del tipo de clustering que se utilice, ya que en algunos no es necesario saber a priori el número de clusters o grupos. Uno de los métodos para determinar el número de clusters o grupos es realizar un análisis a través del clustering jerárquico aplicado al conjunto total de datos o a un conjunto representativo.

A través del análisis del clustering difuso podremos obtener los diferentes conjuntos de las sesiones de usuarios. Cada grupo o cluster posee un centroide que es el elemento que mejor representa al grupo encontrado. Cuando hablamos de un centroide, no queremos decir que se trate de solo "uno", sino que pueden existir varias sesiones que posean las mismas características y representen de mejor manera al grupo o clusters.

De esta manera, al obtener los diferentes centroides de cada grupo encontrado, podremos realizar una representación general de los perfiles de los usuarios. Esta representación reflejará diferentes características relevantes de los usuarios que navegan por el sitio Web, lo que constituye información muy útil al momento de realizar algún tipo personalización dentro del sitio Web.

Para realizar la representación de los perfiles de los usuarios, nos hemos basado en una definición de perfil. Esta definición del perfil de usuario que hemos comentado en la sección 4.1, además, la representaremos a través del lenguaje XML. A continuación veremos la representación general del perfil de usuario a través del lenguaje XML (ver figura 2):

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<Perfil del Usuario>
  <Identificación_Usuario>
    <Tipo Tipo= "{id_usuario}" />
  </Identificación_Usuario>
  <Paginas>
    <Pagina Pagina_Visitada="1"> Nombre Página Visitada </Pagina>
    <Pagina Pagina_Visitada="2"> Nombre Página Visitada </Pagina>
    .
    .
    <Pagina Pagina_Visitada="N"> Nombre Página Visitada </Pagina>
  </Paginas>
  <Var_Demograficas>
    <Paciencia Tiempo de navegación del usuario / Paciencia </Paciencia>
    <Lenguaje idioma de la página / Lenguaje </Lenguaje>
    <Nivel_Educacional Nivel= nivel de dificultad de la página />
  </Var_Demograficas>
  <Perfil_Simple>
    <Termino Termino="1"> Termino </Termino>
    <Termino Termino="2"> Termino </Termino>
    .
    .
    <Termino Termino="N"> Termino </Termino>
  </Perfil_Simple>
</Perfil del Usuario>
  
```

FIGURA 2 REPRESENTACIÓN GENERAL DE UN PERFIL DE USUARIO EN XML

Comenzaremos explicando la parte del perfil llamada Identificación de Usuario. En esta parte del perfil se realiza la identificación del usuario que se haya conectado al menos una vez al sitio, independientemente de que se haya registrado o no en él.

Existe un problema, que hemos comentado en secciones anteriores, vinculado con el registro de los usuarios. Cuando el usuario está registrado, podemos identificarlo y de esta manera podremos realizar una personalización más adecuada de sus preferencias. En cambio, cuando el usuario no está registrado, se le asigna un perfil general relacionado con sus preferencias mostradas al momento de navegar por la Web.

Dentro de la definición del perfil, también tenemos el campo llamado ‘páginas’, que se refiere principalmente a las páginas que el usuario ha visitado durante su navegación por el sitio Web. En el campo de la variable demográfica, hemos definido algunas variables que representan algunas cosas relacionadas con perfil del usuario como el lenguaje, el nivel educativo y la paciencia como característica de su comportamiento durante la navegación.

La variable paciencia está relacionada con el tiempo de navegación el usuario por el sitio Web. A estos valores de tiempo les hemos asociado etiquetas lingüísticas para entender de mejor manera el comportamiento de navegación asociado al tiempo. En la figura 3 podemos ver

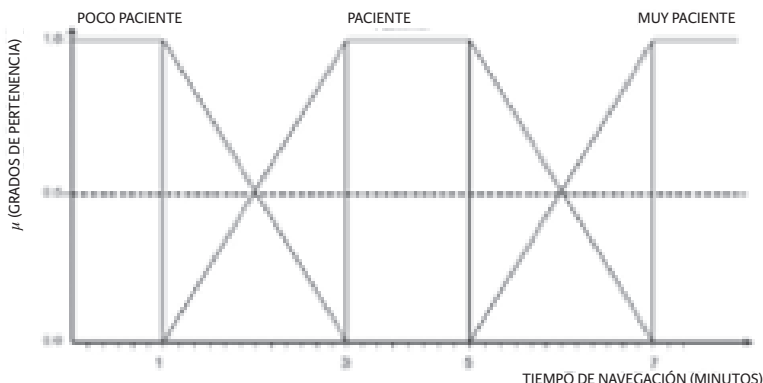


FIGURA 3 ETIQUETAS LINGÜÍSTICAS PARA EL TIEMPO DE NAVEGACIÓN DEL USUARIO

la definición de las etiquetas para la variable de paciencia: Por último, está el campo del perfil simple del usuario, que se relaciona principalmente con las páginas visitadas, la recuperación de información por parte del usuario o, dicho de otra forma, el tipo de información que haya formado parte de su búsqueda. Dentro del código de las páginas Web, existen marcas o tag; entre estas marcas existentes en la páginas podemos resaltar la llamada keyword, que nos indica las palabras claves que se relacionan con el tema o términos importantes dentro del sitio o página Web.

Por ultimo, en la figura 4 podemos ver un ejemplo de resultados obtenidos, en este caso particular, por la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicaciones (ETSIIT) de la Universidad de Granada. El total de perfiles de usuario encontrados fueron de 12. Estos perfiles fueron obtenidos al analizar un conjunto de datos de 15676 transacciones. El objetivo principal del análisis fue identificar si los usuarios que se conectaban eran alumnos o profesores.

De los perfiles obtenidos luego del análisis, podemos decir que la gran mayoría de los usuarios son pacientes o muy pacientes al momento de realizar su navegación por la página de la Escuela. La mayoría corresponden a alumnos y sólo uno de los perfiles corresponde a la de un profesor. Este perfil de profesor se relaciona principalmente con temas como horarios, planes de estudios, convocatorias, entre otros intereses.

Si hacemos referencia a los perfiles de los alumnos, podemos decir que la gran mayoría de los alumnos visitan las páginas de los foros. Dentro de estos foros, podemos encontrar temas relacionados con la programación, la docencia, información general, asignaturas, prácticas, entre otros temas, los cuales se reflejan claramente dentro de los perfiles obtenidos.

De forma general, podemos decir que los términos relacionados con las páginas que visitan los usuarios de la Escuela son principalmente términos relacionados con la Escuela, la Docencia, Temas Generales del Foro, y lo más lógico es que aparezcan términos relacionados con la Ingeniería, la Informática y la Telecomunicaciones.

```

<html version="1.0" encoding="UTF-8" />
<profile>
  <identificacion_usuario>
    <tipo Tipo="alumno" />
    <identificacion_usuario>
  </pagina>
    <pagina Pagina_Usuario="0" />
    <pagina Pagina_Usuario="1" />
    <pagina Pagina_Usuario="2" />
    <pagina Pagina_Usuario="3" />
  </pagina>
  <otra_Demografico>
    <País País="España" />
    <Lenguaje Idioma="Español" />
    <id_usuario_usuario />
  </otra_Demografico>
  <otros_datos>
    <tema Tema="0" />
    <tema Tema="1" />
    <tema Tema="2" />
    <tema Tema="3" />
    <tema Tema="4" />
    <tema Tema="5" />
    <tema Tema="6" />
  </otros_datos>
</profile>
  
```

FIGURA 4
EJEMPLO DE PERFIL OBTENIDO

CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

En este artículo hemos revisado los aspectos principales de la Minería Web, centrándonos en el área de la Minería Web del Uso, incluyendo un pequeño estado del arte. También hemos estudiado diferentes aplicaciones de la Lógica Difusa en la Minería Web, la Minería Web del Uso, el Proceso de Personalización y perfiles de usuarios, donde la mayor parte de los elementos son imprecisos por naturaleza.

De esta manera, hemos propuesto un modelo de representación de perfiles de usuario y hemos definido el perfil a través del lenguaje XML. Hemos mostrado un pequeño ejemplo de los resultados obtenidos del análisis de la escuela de Informática y Telecomunicaciones de la Universidad de Granada, siendo la principal característica la utilización del Clustering Difuso que nos permite detectar un comportamiento general en ciertas sesiones y así obtener una mejor agrupación para la obtención de diferentes perfiles de usuarios.

En relación a los trabajos futuros, nuestra intención es profundizar en el área de la personalización, principalmente crear la estructura necesaria para realizar este proceso y estudiar otras técnicas que nos ayuden a realizar la personalización, además de realizar un análisis de correspondencia que podría estar relacionado con los perfiles y las diferentes IP que podemos encontrar entre los datos.

REFERENCIAS

- [1] **Arlitt, M.** *Characterizing Web User Sessions*, September 1999, Hewlett-Packard Laboratories Technical Report HPL-1999-35R1.
- [2] **Arotaritei, D., Mitra, S.** *Web Mining: a survey in the fuzzy framework*, 2000, *Fuzzy Sets and Systems*.
- [3] **Bezdek, J.C.** *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, 1981, Plenum, NY.
- [4] **Carbonell, J., Carven, M., Fienberg, S., Mitchell T., and Yang, Y.** *Report on the conald workshop on learning from text and the web*, 1998, In CONALD Workshop on Learning from Text and The Web, June.
- [5] **Cooley, R., Mobasher, B., and Srivastava, J.** *Web mining: Grouping Web Page References into Transactions for Mining World Wide Web Browsing Patterns*, 2000, 1-11.
- [6] **Chakrabati, S.** *Data Mining for hypertext: A tutorial survey*, 2000, *ACM SIGKDD Explorations* 1(2):1-11.
- [7] **Chen, M. S., Park, J. S., Yu, P. S.** *Data mining for path traversal patterns in a web environment*, 1996 In Proc. 16th International conference on distributed computing systems, pp. 385-392.
- [8] **Datta A., Dutta K., VanderMeer D., Ramamritham K. and Navathe S. B.** *An architecture to support scalable online personalization on the Web* *The VLDB Journal* 10: 104-117 (2001) Springer-Verlag New York 2001.
- [9] **Delgado, M., Sánchez, D. and Vila, M.A.** *Fuzzy cardinality based evaluation of quantified sentences*, 2000, *Int. J. Aprox.Reasoning*.

- [10] Delgado, M., Martín-Bautista, M.J., Sánchez, D., Vila, M. A.** Mining Text Data: Special Features and Patterns. Pattern Detection and Discovery, Proceedings ESF Exploratory Workshop, D.J. Hand, N. Adams and R. Bolton (Eds.), Lecture Notes in Artificial Intelligence Series, 2002, 140-153.
- [11] Delgado, M., Marín, N., Sánchez, D. & Vila, M.A.,** Fuzzy Association Rules: General Model and Applications, 2003, IEEE Transactions on Fuzzy Systems 11, 214-225.
- [12] Eirinaki M., and Vazirgianis M.,** "Web Mining for Web Personalization", ACM Transactions on Internet Tehnology (TOIT), volume 3, issue 1, 2003.
- [13] Etzioni, O.** The World Wide Web: Quagmire or gold mine, 1996, Communications of the ACM, 39, 65-68.
- [14] García F. J, Gil , A. Personalización y Recomendación en Aplicaciones de Comercio Electrónico. En Avances en Comercio Electrónico, F.García Peñalvo (Ed.), pp.137-148, Editorial Catedral. ISBN: 84-607-5827-3, 2002.
- [15] Justicia, C., Martín-Bautista, M. J., Sánchez, D.:** Minería de textos: Aplicaciones con lógica difusa, 2004, Actas del Congreso Español de Tecnologías con Lógica Difusa, Jaén, (In Spanish).
- [16] Menascé, D., Almeida, V., Fonseca, R. and Mendes, M.** A Methodology for Workload Characterization of Ecommerce Sites, 1999, Proceedings of ACM Conference on Electronic Commerce (EC-99), Denver, CO, November.
- [17] Martín-Bautista M. J., Kraft D. H, Vila M. A., Chen J. and Cruz J..** User profiles and fuzzy logic for Web retrieval issues. Springer Berlin / Heidelberg. ISSN: 1432-7643 (Paper) 1433-7479 (Online) Volume 6, Number 5, pages 365 – 372. August 2002.
- [18] Mitra, S., Pal, S.K:** Data Mining in Soft Computing Framework: A Survey, 2002 IEEE Transactions on Neural Networks, 3-14.
- [19] Mobasher, B., Cooley, R. and Srivastava, J.** Creating Adaptive Web Sites Through Usage-Based Clustering of URLs, November 1999, in Proceedings of the 1999 IEEE Knowledge and Data Engineering Exchange Workshop (KDEX'99).
- [20] Mobasher, B.:** Web Usage Mining and Personalization, 2005, Practical Handbook of Internet Computing M.P.Singh, ed. CRC Press LLC.
- [21] Nasraoui, O., Frigui, H., Joshi, A., and Krishnappuram, R.** Mining Web access logs using relational competitive fuzzy clustering, 1997, In Proceedings of springs Symposium on Natural Language Proccesing Form the www, Stanford, California. March.
- [22] Pierrakos D., Paliouras G., Papalheodorou C. and Spyropoulos C.** Web Usage Mining as a tool for personalization:a survey. Kluwer Academic Publishers, vol 13, issue 4, pages 311-372. Hingham, MA, USA, 2003.
- [23] Zadeh, L.** The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning, 1975, Information Sciences 8, 51-199.



UTEM

UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
METROPOLITANA
del Estado de Chile