INGENIUS

INGENIUS • Número 15 • Enero/Junio 2016. Revista semestral de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Eléctronica, Ingeniería de Sistemas, Ingeniería Civil, Ingeniería Industrial y aquellas vinculadas con la Física y Matemática.

Consejo Editorial

Gustavo A. Rovelo Ruiz, Hasselt University, Diepenbeek – Bélgica. Julio César Viola, Universidad Simón Bolívar, Caracas - Venezuela. Paulo Peña Toro, Ministerio de Industrias y Productivad, Quito – Ecuador. Franklin Gavilánez Álvarez, American University, Washington D. C. – Estados Unidos. Piedad Gañán Rojo, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia. José Alex Restrepo, Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela. Sergio Luján Mora, Universidad de Alicante, Alicante – España. Martha Lucía Zequera Díaz, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá – Colombia. Grover Zurita Villarroel, Universidad Privada Boliviana, Cochabamba – Bolivia. Mariela Cerrada Lozada, Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. Vladimir Robles Bykbaev, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Pablo Parra Rosero, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil - Ecuador. Germán Arévalo Bermeo, Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador. Diego Peñaloza Rivera, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Luis Garzón Muñoz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. John Calle Sigüencia, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador (Editor responsable).

Tiraje: 3600 ejemplares

Indización. INGENIUS está indizada en el catálogo Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. El acceso a la versión electrónica se encuentra en www.latindex.unam.mx

Copyright. INGENIUS 2016, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología

Número 15, enero – junio 2016

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

Indexada en:



Sistema Regional de Información en línea para Revistas Científicas de

URKUND

América Latina, El Caribe, España y Portugal.

La administración de INGENIUS se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico

Los artículos cuentan con código de identificación (Digital Object Identifier)

El proceso editorial se gestiona a través del Open Journal System

Es una publicación de acceso abierto (Open Access) con licencia Creative Commons



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*. Los artículos de la presente edición pueden consultarse en

http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius



Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador





Rector

Javier Herrán Gómez, sdb Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja Casilla Postal 2074 Cuenca, Ecuador Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Fax: (+593 7) 408 89 58 Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

Vicerrector General Académico

Luis Tobar Pesántez

Vicerrector Docente Fernando Pesántez Avilés

Vicerrector de Investigación Juan Salgado Guerrero

Vicerrectores de Sede

César Vásquez Vásquez (Cuenca) José Juncosa Blasco (Quito) Andrés Bayolo Garay (Guayaquil)

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología, publicación semestral, N.º 15, Enero-Junio 2016.

Editor responsable: John Calle Sigüencia. ISSN: 1390-650X. Domicilio de la publicación: Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Casilla postal 2074, Cuenca, Ecuador. Centro Gráfico Salesiano, Calle Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres. Teléfono: (+593 7) 283 17 45, Cuenca, Ecuador.

Correo electrónico: revistaingenius@ups.edu.ec

©INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología. Impreso en Ecuador.

Los conceptos expresados en los artículos competen a sus autores. Los artículos de la presente edición pueden consultarse en la página web de la revista.

Tiraje: 3600 ejemplares

Consejo de Publicaciones

Javier Herrán Gómez, sdb PRESIDENTE

Juan Bottaso Boetti, sdb Teodoro Rubio Martín José Juncosa Blasco Jaime Padilla Verdugo Floralba Aguilar Gordón Sheila Serrano Vicenti Fabricio Freire Morán John Calle Sigüencia Armando Grijalva Brito Alexandra Martínez Flores Mónica Ruiz Vásquez

Luis Álvarez Rodas EDITOR GENERAL

Sistema tipográfico usado en la composición de este documento LATEX.

Editorial

Estimadas y estimados lectores:

La investigación es un factor fundamental para garantizar la innovación y el desarrollo, promoviendo y fortaleciendo productos, procesos, materiales, máquinas, servicios y una serie de elementos que aportan a solventar las necesidades de una sociedad cada vez más demandante. En este contexto las publicaciones científicas asumen un papel preponderante ya que son el medio por el cual se dan a conocer estos avances y se promueve la integración regional y mundial que permite que toda la comunidad científica pueda interactuar rompiendo los límites geográficos y posibilitando que todos los investigadores aporten de una manera efectiva en los diferentes ámbitos de investigación.

La revista INGENIUS asumiendo el reto de convertirse en un medio de divulgación científica que sea reconocida mundialmente se ha preocupado por buscar indizarse en bases de datos científicas que le permitan alcanzar este objetivo; la primera en este proceso fue LATINDEX, sistema regional de información en línea para revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, lo que ha permitido que los artículos publicados sean visibilizados y los resultados son evidentes ya que los mismos han sido referenciados en publicaciones que se encuentran en otros índices de alto prestigio.

Para enero del presente año, la Edición General y el Editor Responsable de la Revista han venido trabajando para lograr que INGENIUS pase a formar parte del *Directory of Open Access Journals*-DOAJ. A partir de los Talleres impartidos por expertos tanto de REDALYC como de SCOPUS entre abril y mayo del presente año, INGENIUS está siendo evaluada para en corto y mediano plazo pasar a formar parte de estos importantes Índices Internacionales.

Las tendencias en investigación y publicación científica evolucionan constantemente así como sus herramientas de evaluación, por esta razón la Revista utiliza los sistemas antiplagio académicos URKUND y CROSS CHECK; los artículos cuentan con Digital Object Identifier DOI; es una Publicación de tipo Open Access con licencia Creative Commons; las políticas copyright y de uso post print, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo SHERPA/ROMEO; los artículos de INGENIUS se encuentran respaldados en el Sistema de Autoarchivo PORTICO, lo que garantiza la permanencia on line; el proceso editorial se gestiona a través de Open Journal Systems (OJS) y para la aceptación de los artículos se realiza revisión por pares científicos (peer review) y para ello se ha fortalecido el Consejo Editorial y la nómina de revisores.

Lo antes planteado ratifica el compromiso institucional de consolidar los valores de equidad y neutralidad en el acceso a la información, además la calidad garantizada en el proceso editorial fortalece el actuar de la comunidad científica y el aporte de INGENIUS se complementa con el trabajo de los investigadores y la confianza que ellos tienen por el tratamiento ético y científico que se da a sus aportaciones.

> John Calle Sigüencia, M. Sc. Editor responsable

Índice

Solar manager: plataforma cloud de adquisición, tratamiento y visualización de in- formación de sistemas fotovoltaicos aislados. Solar manager: cloud platform for acquisition, processing and visualization of infor-	
Jesús Guamán-Molina, Carlos Vargas-Guevara, Rubén Nogales-Portero, David Guevara- Aulestia, Mario García-Carrillo, Alberto Ríos-Villacorta.	5
Caracterización del flujo de aire en colinas para el emplazamiento de parques eólicos. Characterization of air flow in hills for emplacement of wind farms Fran Reinoso-Avecillas, Nelson Jara-Cobos, Pablo Gómez-del Pino, César Nieto-Londoño.	17
Use of multicriteria decision making methods for biomass selection in Fischer Tropsch reactors.	
Uso de métodos multicriterio de toma de decisiones para la selección de biomasa en reactores Fischer Tropsch	27
Análisis comparativo de los modelos dinámicos de una turbina eólica de velocidad fija.	
Comparative analisys of dinamics models of a fixed speed wind turbine Jesús Guamán-Molina, Carlos Vargas-Guevara, Katherin Rodríguez-Mora, Mario García- Carrillo, Alberto Ríos-Villacorta.	37
Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo. Performance analysis of developing water systems through the coupling hydrologic stochastic models and network flow optimization	48
Inversor multinivel acoplado sin transformador a la línea eléctrica para la incorpo- ración de fuentes fotovoltaicas distribuidas.	
Grid connected inverter without transformer for the inclusion of distributed photo- voltaic sources	58
Palomeque.	
Identification and GPC control of an AC motor using Dspace. Identificación y control CPG de un motor de CA con Dspace Juan Moreno-Peña, William Ipanaqué-Alama.	66
Normas editoriales	73
Guidelines	77



Solar Manager: plataforma cloud de adquisición, tratamiento y visualización de información de sistemas fotovoltaicos aislados

SOLAR MANAGER: CLOUD PLATFORM FOR ACQUISITION, PROCESSING AND VISUALIZATION OF INFORMATION FROM ISOLATED PV SYSTEMS

Jesús Guamán-Molina^{1,*}, Carlos Vargas-Guevara¹, Rubén Nogales-Portero², David Guevara-Aulestia³, Mario García-Carrillo⁴ y Alberto Ríos-Villacorta⁵

Resumen

Este artículo describe una plataforma de adquisición, procesamiento y visualización del funcionamiento para instalaciones solares fotovoltaicas aisladas, denominada SOLAR MANAGER. La particularidad de la plataforma implementada es que se integra en un modelo CLOUD COMPUTING híbrido, basada en programación de código abierto. La plataforma CLOUD permite adquirir mediciones de tensión, intensidad, humedad y temperatura de forma remota desde sensores no invasivos. Las pruebas de adquisición de datos y validación se realizaron en una instalación fotovoltaica aislada de la Universidad Técnica de Ambato. El sistema de adquisición proporciona la información necesaria para el monitoreo, mantenimiento y supervisión del correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico.

Abstract

This article describes a platform of acquisition, processing and visualization of the behavior for isolated solar systems called SOLAR MANAGER. The recording of measurements was conducted in an isolated photovoltaic installation of the Ambato Technical University Faculty of Electronics Engineering and Industrial Systems. The acquisition system will provide the information necessary for performing maintenance monitoring, operation and supervision through variables such as voltage, current, temperature and humidity system to generate renewable energy remotely from a CLOUD COMPUTING platform.

Recibido: 12-01-2016, aprobado tras revisión: 07-03-2016

^{1,*}Unidad Operativa de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador. Autor para correspondencia ⊠: jguaman0585@uta.edu.ec

 $^{^2 \}mathrm{Docente}$ de la carrera de Ingeniería Industrial, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador.

³Docente de la carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador.

⁴Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador.

⁵Investigador Prometeo, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador.

Forma sugerida de citación: Guamán, J.; Vargas, C.; Nogales, R.; Guevara, D.; García, D. y Ríos, A. (2016). «Solar manager: plataforma cloud de adquisición, tratamiento y visualización de información de sistemas fotovoltaicos aislados». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 5-16. ISSN: 1390-650X.

La plataforma presenta un bajo costo económico, por su programación en código abierto, y puede competir con los sistemas de monitoreo comerciales, actualmente existentes. En un futuro, la plataforma CLOUD SOLAR MANAGER se podría emplear como un centro de monitoreo nacional de instalaciones fotovoltaicas aisladas instaladas en el Ecuador.

Palabras clave: CLOUD, monitoreo remoto, programación Open Source, sistemas fotovoltaicos. It is intended that the implemented system is economically viable, because the system is developed in open source allowing compete with commercial monitoring systems. The control and monitoring of photovoltaic installations isolated platform - SOLAR MANAGER, in the future one will become a central monitoring and control of all isolated PV plants installed all over the country.

Keywords: CLOUD, monitoring, ARDUINO, Open Source programming, Photovoltage systems.

1. Introducción

Actualmente, la energía eléctrica suministrada por las instalaciones fotovoltaicas es económicamente muy competitiva, debido al gran avance tecnológico y a la reducción de los costos de inversión, experimentado en los últimos años.

En el Ecuador, se ha instalado un considerable número de sistemas fotovoltaicos aislados en zonas rurales de difícil acceso. La principal problemática, asociada a las instalaciones aisladas fotovoltaicas, es la ausencia de un sistema de monitoreo remoto que permita realizar un adecuado seguimiento de su funcionamiento [1].

La falta de un sistema de monitoreo puede provocar la interrupción del suministro de energía eléctrica a los usuarios de zonas aisladas. Los sistemas aislados fotovoltaicos instalados exigen el empleo de dispositivos inalámbricos de medición y plataformas informáticas, que permitan la realización de un seguimiento en tiempo real de su funcionamiento.

Los sistemas de monitoreo permiten agilizar las labores de operación y mantenimiento de los componentes que integran el sistema de generación fotovoltaica [1].

Hoy en día, la gran variedad de sistemas comerciales de monitoreo de instalaciones fotovoltaicas presentan varias desventajas como:

- Dependencia del *software* del fabricante.
- Limitado control autónomo.
- Considerable consumo energético.
- Capacidad limitada de almacenamiento.
- Elevado costo de mantenimiento.

Estas desventajas incentivan el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en *software* y *hardware* libre. En este sentido, la implementación de la Plataforma SOLAR MANAGER Plataforma CLOUD de Adquisición, Tratamiento y Visualización de Información de Sistemas Fotovoltaicos Aislados, se realizó empleando *software* y *hardware* de código abierto, ofreciendo así un sistema modular, fácilmente adaptable y con una gran capacidad de integrarse a nuevas tendencias tecnológicas.

En la actualidad, la existencia de servicios y aplicaciones informáticas, así como, los sistemas inalámbricos de monitoreo remoto permiten la transmisión y almacenamiento de un gran volumen de datos registrados. Las plataformas CLOUD COMPUTING representan la mejor solución para el manejo de grandes volúmenes de información y servicios Web, además, permiten garantizar unas adecuadas características de fiabilidad, escalabilidad y accesibilidad. El empleo de un sistema de código abierto proporciona excelentes prestaciones:

- Reducción de consumo energético y costes del equipo.
- Acceso remoto.
- Actualizaciones automatizadas y de reducido costo.
- Altas opciones de almacenamiento escalable.
- Mejora del sistema a través de la programación Open Source.
- Capacidad de configuración personalizada de funcionalidades de la plataforma.

2. Descripción de las experiencias existentes de monitoreo remoto

En los últimos años, se han desarrollado innovadoras propuestas en relación con los sistemas inalámbricos de monitoreo remoto. Las experiencias más destacables se describen a continuación.

En [2], se plantea el uso de microcontroladores de la plataforma ARDUINO, compuesta por módulos de *hardware* y *software* libre, diseñados para controlar, supervisar y monitorear el estado y funcionamiento de diferentes dispositivos electrónicos. El empleo de la plataforma ARDUINO presenta grandes ventajas por su programación rápida, sencilla y su entorno de fácil aprendizaje.

El diseño de la plataforma ARDUINO es simple, de bajo costo y consumo energético, en comparación con los microcontroladores BeagleBone y con las tarjetas Raspberry Pi. Asimismo, la plataforma ARDUINO tiene su propio lenguaje de programación, compatible con diferentes distribuciones de sistemas operativos, y que proporciona una forma sencilla para interactuar con otros dispositivos.

Por otro lado, los dispositivos BeagleBone y Raspberry Pi disponen de un sistema operativo GNU/Linux. La adquisición de señales análogas de alta intensidad podría ocasionar daños en la memoria del dispositivo, donde se encuentra instalado el sistema operativo.

La Tabla 1 presenta un análisis comparativo de las tecnologías descritas.

En [3], se presenta un control domótico, basado en la plataforma ARDUINO, como alternativa de bajo coste a sistemas comerciales de control. El empleo de microcontroladores ARDUINO permite reducir el costo de implementación del control domótico, asimismo, integra dispositivos de bajo consumo de energía como sensores, reguladores, actuadores, comunicadores.

	ARDUINO	BeagleBone	Raspberry PI	
	uno			
Model	R3	REV A5	MODEL B	
Processor	ATmega 328	ARMCortex-A8	ARM11	
Clock	$16 \mathrm{~MHz}$	700 MHz	700 MHz	
speed				
RAM	2 KB	256 MB	256 MB	
Flash	32 KB	4 GB	SD	
Min	42 mA	170 mA	700 mA	
power				
Digital	14	66	8	
input				
Analog	6	7	N/A	
input			·	
Ethernet	N/A	10/100	10/100	
Dev. ide	ARDUINO	Python.Scratch.	IDLE.Scratch.	
	tool	CLOUD9/Linux	Squeak/Linux	
Cost	\$ 29.95	\$ 199.95	\$ 35.00	

Tabla 1. Comparación entre ARDUINO, BeagleBone y Raspberry Pi

Se prevé que el empleo de sensores permita la obtención de información sobre el estado de las habitaciones de una vivienda. Los sensores y actuadores enviarán información a través de una comunicación inalámbrica, aplicando los protocolos de comunicación Bluetooth y XBEE.

Las acciones requeridas por el usuario serán gestionadas a través de un servidor, permitiendo el control y visualización de la información fuera de la vivienda por medio de aplicaciones móviles o desde un navegador Web.

Además, en el diseño del servidor se incluye un microprocesador central ARM1176JZF-S, con una frecuencia de operación de 700 MHz. En este sentido, el servidor establecerá la comunicación entre los dispositivos de medición y control desde ambientes individuales o generales.

La conexión hacia el servidor se realizará empleando un módulo Ethernet para ARDUINO, a través de una conexión física hacia un enrutador. De esa manera, todos los dispositivos que se encuentren dentro de la red local podrán acceder al servidor.

En la Figura 1, se observa una prueba del funcionamiento del servidor domótico, basado en un microcontrolador ARDUINO. El servidor indica el lugar de la vivienda de adquisición de datos y proporciona una variable de medición, requerida por el usuario, en este caso la temperatura.

El diseño de un sistema de registro de variables eléctricas, basado en un sistema de comunicación Ethernet se presenta en [4], que permite obtener información sobre el consumo eléctrico en las instalaciones de una vivienda unifamiliar. El diseño del registrador se basa en el uso de la tecnología ARDUINO.

Mozilla Firefox	
🗌 http://192.168or/temperatura 📑	
I92.168.1.12/comedor/temperatura	
Servidor Web Arduino	
Formato de los eventos: /habitacion/dispositivo/valor/	
BufferEther: comedor/temperatura	
Habitacion: comedor	
Dispositivo: temperatura	
Valor: 22	
Temperatura: 22gradosC	

Figura 1. Servidor Web basado en ARDUINO [3].

Además, la información adquirida es procesada por los microcontroladores y transmitida mediante el protocolo Ethernet hacia una interfaz gráfica. En el proceso de adquisición y registro se empleó un ARDUINO Micro, conectado con sensores de voltaje y corriente. La trasmisión de datos hacia Internet se ejecuta por un ARDUINO Uno, incorporado con su respectivo módulo Ethernet, Figura 2.



Figura 2. Módulo Ethernet compatible con ARDUINO Uno y Mega [4]

En [5], se presenta un sistema de monitoreo de bajo costo, con características flexibles para el control y monitoreo desde dispositivos móviles. El sistema integra un servidor Web, que establece una conexión IP-Internet Protocol para el acceso y control de aparatos y dispositivos electrónicos.

El acceso y control se realiza desde aplicaciones desarrolladas en el entorno del sistema Android de los teléfonos inteligentes.

La arquitectura del sistema de control y monitoreo está compuesta por tres capas:

- Entorno del hogar.
- Puerta de enlace.
- Entorno remoto.

El entorno remoto comprende a todos los usuarios, que a través de una aplicación acceden al sistema empleando un dispositivo móvil, con sistema operativo Android. El empleo de un dispositivo móvil permite que el usuario acceda desde una conexión WIFI o a través de una red 3G/4G.

Por otra parte, la puerta de enlace establece la comunicación entre un módulo de interfaz de *hardware* y un servidor Web. El dispositivo principal que integra el servidor Web es un microcontrolador ARDUINO, con su respectivo módulo Ethernet. El empleo de este microcontrolador permite que el servidor realice la gestión, control y monitorización de los componentes del módulo de la interfaz de *hardware*.

El servidor notifica al usuario sobre el estado del módulo de interfaz de *hardware* a través de informes periódicos. La información presentada en los informes se adquiere desde los sensores y actuadores, interconectados con el microcontrolador ARDUINO, Figura 3.



Figura 3. Arquitectura del sistema de control y monitoreo con ARDUINO [5]

En el año 2014, en la India, el Instituto Tecnológico

de Ingeniería de Chennai propuso un sistema de iluminación, supervisado a través de una plataforma de monitorización con un servidor en la nube.

El sistema de adquisición de datos se basa en la tecnología ARDUINO, que transmite la información del estado de cada componente del sistema de iluminación, con ayuda de una red inalámbrica de sensores Zigbee, basados en el estándar 802.15.4.

La implementación de una red inalámbrica de sensores exige la ubicación correcta y segura de los equipos informáticos, que se conectan a servidor Web. La información del estado del sistema de iluminación se actualiza automáticamente a través de Internet [6].

Además, la información se presenta con ayuda de informes para períodos establecidos por el usuario. En la Figura 4, se puede observar el diagrama de bloques del sistema implementado.



Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de monitorización en la nube [6].

El Internet de las cosas, IoT, permite enlazar dispositivos físicos con la eeb con ayuda de sensores y actuadores [7]. La mencionada interconexión facilita el desarrollo de sistemas de monitoreo, plataformas de mediciones inteligentes, automatización de hogares, sistemas inteligentes de alumbrado público y sistemas telegestionados desde dispositivos con acceso a Internet.

La información adquirida desde los sensores se gestiona a través de un servidor Web, con acceso rápido desde dispositivos móviles y fijos. Asimismo, el empleo de un servidor le permitirá al usuario controlar procesos y supervisarlos desde Internet, Figura 5.

El análisis de las experiencias existentes indica una serie de deficiencias y desventajas de los sistemas experimentales y comerciales de los sistemas inalámbricos de monitoreo remoto.





La implementación de la plataforma de monitoreo SOLAR MANAGER permite adaptar e integrar las ventajas de los innovadores sistemas inalámbricos de monitoreo remoto en la adquisición de información de los sistemas fotovoltaicos aislados y superar las deficiencias anteriormente descritas.

Las ventajas de la plataforma SOLAR MANAGER son:

- Una solución escalable, basada en *hardware* y *software* libre;
- Implementación de una plataforma CLOUD con servicios Web en la modalidad «SaaS» para la gestión y publicación de la información registrada;
- Propuesta de creación de un innovador centro de monitoreo de las instalaciones renovables aisladas del Ecuador con bajo costo.

3. Estructura de la Plataforma SOLAR MANAGER

El desarrollo de la plataforma SOLAR MANAGER, Plataforma CLOUD de adquisición, tratamiento y visualización de Información de Sistemas Fotovoltaicos Aislados, consideró cuatro fases importantes en el proceso de implementación:

- Implementación de la plataforma CLOUD.
- Adquisición de la información.
- Tratamiento de la información.
- Visualización de la información.

3.1. Implementación de la Plataforma CLOUD

La computación en la nube es la tecnología que permite brindar servicios de manera distribuida. La información se presenta al usuario de manera centralizada con altas prestaciones. Una plataforma CLOUD, en forma general, se divide en tres capas: adquisición, almacenamiento y conectividad [7].

En la Figura 6, se observa la conexión entre varios dispositivos de almacenamiento de la información, con dispositivos de visualización y adquisición de la información, que posteriormente será publicada en una base de datos remota.



Figura 6. Diagrama de acceso a la plataforma CLOUD [7].

La computación en la nube o CLOUD COMPUT-ING presenta diversas arquitecturas de servicios (IaaS, SaaS, PaaS y XaaS). Para la adecuada selección de la plataforma CLOUD es necesario realizar un análisis comparativo de las arquitecturas actualmente existentes tales como OPEN STACK, OPEN NEBULA y EUCALYTPUS.

En el análisis comparativo se consideraron las siguientes características técnicas: escalabilidad, seguridad y redundancia de almacenamiento de datos en casos de emergencia. Este análisis comparativo permitió concluir que las mayores prestaciones las proporciona la arquitectura de *software* denominada OPEN STACK. OPEN STACK es una plataforma CLOUD COMPUTING, desarrollada por la NASA, que dispone de una arquitectura escalable, compatible, flexible y abierta [8].

La plataforma de CLOUD COMPUTING garantiza:

- Fiabilidad, escalabilidad y disponibilidad de los servicios y aplicaciones prestadas.
- La capacidad de ajustar los costos económicos en gastos fijos.

En la Figura 7, se muestra la arquitectura de la plataforma OPEN STACK. La arquitectura OPEN STACK integra un CONTROLLER NODE, COMPUTE NODE, un servicio de imagen STOR-AGE NODE, objetos de almacenamiento de OPEN STACK y otras aplicaciones como el DASHBOARD, KEYSTONE y QUANTUM, que permiten una rápida implementación de sistemas de gestión remota.



Figura 7. Diagrama de bloques de la Arquitectura OPEN STACK [8].

El controlador, conocido como Nova, permite administrar la plataforma a través de nubes en configuraciones IaaS. Asimismo, gestiona redes empleando varias máquinas virtuales. Por otra parte, el servicio de imagen del OPEN STACK permite el almacenamiento de información y la distribución de imágenes hacia los discos de las máquinas virtuales.

Los objetos de almacenamiento de OPEN STACK ofrecen mayor espacio de almacenamiento, escalabilidad y redundancia [8]. OPEN STACK permite almacenar información en el orden de pentabytes en función del *hardware* disponible.

En la Tabla 2, se muestra una comparativa de las principales soluciones de arquitecturas de CLOUD COMPUTING en función al servicio IaaS. En el análisis comparativo se han considerado los parámetros de seguridad, almacenamiento de la información, código y licencia que posee cada solución de la nube [8].

Tabla 2. Comparación del servicio IaaS de las plataformasCLOUD [8].

	Solutions CLOU EUCALYTPUS	UD COMPUTI OpenNebula	NGs IAAS OpenStack
Storage	+++++	+++	+++++
Network	++++	++++	+++++
Security	++++	+++	++++
Hypervisor	++++	+++	+++++
Scalable	+++	++++	+++++
Installation	++	+++	+++++
Documentation	+++	+++	+++++
Code and License	+++	+++++	+++++

De la Tabla 2, se observa que el *software* de arquitectura CLOUD OpenStack proporciona una mayor prestación de servicios en comparación a las arquitecturas EUCALYTPUS y OPEN NEBULA. OPEN STAK facilita la instalación, configuración, administración y escalabilidad de la plataforma CLOUD.

3.2. Adquisición de la información

La segunda fase del SOLAR MANAGER se compone de sensores electrónicos de bajo consumo energético. Los sensores miden magnitudes asociadas al funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, registrando valores de tensión, intensidad, temperatura y humedad.

La información registrada en tiempo real es necesaria para conocer el comportamiento de estas instalaciones fotovoltaicas frente a diferentes situaciones, garantizando la continuidad del servicio eléctrico a los usuarios. La plataforma SOLAR MANAGER se encuentra implementada en una instalación fotovoltaica aislada de la Universidad Técnica de Ambato.

En la Figura 8, se presentan los componentes del sistema fotovoltaico aislado evaluado:

- 3 paneles fotovoltaicos de 100 Wp.
- 4 baterías de 105 Ah.
- 1 regulador de carga de 40 A.
- 1 inversor de 2500 W.



Figura 8. Sistema de generación renovable de la FISEI.

Es importante indicar que la monitorización del sistema permite evaluar el rendimiento energético del sistema solar fotovoltaico. La plataforma de CLOUD COMPUTING permite visualizar la información registrada por medio de reportes periódicos según las necesidades del usuario [9].

El sistema de adquisición implementado permite conocer el estado de operación del sistema fotovoltaico en tiempo real. Las variables a ser monitoreadas son tomadas de los subsistemas que integran la instalación fotovoltaica. En este sentido, se monitorean los paneles fotovoltaicos, regulador, baterías e inversor. En cada subsistema las magnitudes monitoreadas son la tensión e intensidad.

El sistema de adquisición de información está compuesto por:

- Módulos XBEE.
- ARDUINO MEGA.
- ARDUINO ETHERNET SHIELD.
- Resistencias.
- Sensor ACS 712.
- Sensor DHT 22.
- Sensor SCT-013.

Los valores de las magnitudes anteriormente mencionadas en los módulos fotovoltaicos son adquiridos por sensores compatibles con la tecnología ARDUINO. La transmisión de estas magnitudes se realiza a través de un módulo de comunicación inalámbrica de tecnología XBEE.

Para medir la temperatura y humedad de los módulos fotovoltaicos se empleó el sensor DHT 22. Las mediciones de temperatura y humedad se realizaron con el sensor DHT22. El microcontrolador ARDUINO adquiere directamente los valores de lectura desde la librería propia del sensor.

Las magnitudes eléctricas de tensión e intensidad del inversor son medidas con ayuda de sensores. Se emplea un sensor no invasivo SCT-013 tipo pinza para la adquisición de información de la intensidad de corriente. Los módulos fotovoltaicos presentan un rango de tensión máxima ideal de 17.20 V en corriente continua.



Figura 9. Transferencia de información a través del módulo Ethernet de ARDUINO

Para la medición de voltaje, se empleó un divisor de tensión, que permite acoplar la señal de voltaje a los niveles de operación de la tarjeta ARDUINO. La intensidad se mide con el sensor ACS 712, con un rango de intensidades hasta 30 A, Figura 9.

El ARDUINO MEGA procesa los datos adquiridos y los trasmite, a través de una comunicación física establecida por medio del módulo Ethernet, hacia un servidor Web alojado en una nube, Figura 10.



Figura 10. Transferencia de información a través del módulo Ethernet de ARDUINO.

Las magnitudes eléctricas exigen un circuito de acondicionamiento de la señal para ser monitoreada. En la Figura 11 se presenta la configuración habitual de un divisor de tensión. El divisor de tensión garantiza un voltaje máximo de 5V DC, permitiendo el correcto funcionamiento del microcontrolador ARDUINO.



Figura 11. Simulación del divisor de tensión.

En la Figura 12, se presenta el circuito de acoplamiento compatible entre el sensor SCT-013 y la tarjeta ARDUINO. El empleo de resistencias conectadas en serie cumple con la misma función del divisor de tensión.

Adicionalmente, se deberá utilizar un transformador de energía AC/AC y un rectificador de onda, que limita el voltaje aplicado al microcontrolador.

El sensor SCT-013 proporciona una señal de corriente en forma senoidal. Por este motivo, se establece una resistencia de carga y un divisor de tensión para limitar la señal senoidal entre los 0-5 Vdc, admisibles por el microcontrolador de la tarjeta ARDUINO.

3.3. Tratamiento de la información

El tratamiento de la información registrada se basa en un sistema de comunicación inalámbrica, implementada con varios módulos XBEE. Los módulos XBEE establecen una comunicación con un alcance máximo de 100 metros de distancia, con línea de vista directa y 30 metros de distancia, sin línea de vista. Además, los módulos XBEE pueden ser configurados como dispositivos finales de una red, denominados end device. En la mencionada configuración, los módulos pueden conectarse con diversos sensores y actuadores.



Figura 12. Circuito de acoplamiento para el sensor SCT-013.

La información se envía a través de una trama de comunicaciones. En este sentido, los módulos XBEE deben ser programados en modo API. En la Figura 13, se muestra un ejemplo de una trama de datos configurada en modo API [9]. En la trama, se puede notar las direcciones origen y destino de los módulos XBEE. Asimismo, se observa la identificación de la red establecida por los módulos de comunicación.

El registro 0XF5, proporcionado por el bit 19, se denomina checksum y permite observar la longitud en bits de los datos en el momento de procesar la información.

Las magnitudes obtenidas de las mediciones son procesadas en un ARDUINO MEGA. Se empleó un ARDUINO MEGA por el número de puertos seriales disponibles para la comunicación entre los módulos XBEE y Ethernet.

	Byte	Example	Description					
+	0	0x7e	Start byte - Indicates beginning of data frame					
sen	1	0x00	Length – Number of bytes (ChecksumByte# – 1 – 2)					
eq	2	0x10						
£	3	0x17	Frame type - 0x17 means this is a AT command Request					
P	4	0x52	Frame ID – Command sequence number					
Ial	5	0x00	64-bit Destination Address (Serial Number)					
E	6	0x13	MSB is byte 5, LSB is byte 12					
ō	7	0xA2						
F	8	0x00	0x00000000000000 = Coordinator					
A	9	0x40	0x0000000000FFFF = Broadcast					
ote	10	0x77						
Ē	11	0x9C						
Re	12	0x49						
o	13	0xFF	Destination Network Address					
it i	14	0xFE	(Set to 0xFFFE to send a broadcast)					
Ĕ	15	0x02	Remote command options (set to 0x02 to apply changes)					
for	16	0x44 (D)	AT Command Name (Two ASCII characters)					
ā	17	0x02 (2)						
A	18	0x04	Command Parameter (queries if not present)					
	19	0XF5	Checksum					

Figura 13. Trama de datos de los XBEE en modo API [9].

El ARDUINO MEGA capta la trama de información con ayuda del SHIELD XBEE, transmitido desde el XBEE en modo end device. El XBEE procesa la información de las magnitudes, adquiridas por los sensores, conectados en las entradas analógicas. Una vez procesada la información, el ARDUINO MEGA transmite los datos adquiridos por medio del módulo ETHERNET.

Gracias al programa EURO-SOLAR existe servicio de internet en las comunidades aisladas del Ecuador. La tecnología V-SAT permite la conexión a través de internet al servidor CLOUD, instalado en la Universidad Técnica de Ambato.

La adquisición de datos desde la plataforma CLOUD se realiza con ayuda del método GET. Este método permite trasmitir la información desde al AR-DUINO hasta un archivo (.PHP), alojado en la nube. En caso de no existir conexión a Internet, la transmisión de información se realizará por medio de tecnologías móviles: GSM, GPRS, HSDPA y 4G.

3.4. Visualización de la información

La dirección IP es una dirección pública, que permite el acceso a la información desde Internet, en cualquier lugar geográfico que disponga de una conexión a la Internet. En el archivo (.PHP) se estableció un sistema de identificación con un nombre de usuario y una clave de acceso única. De esa manera, se prevé contar con un sistema de seguridad de la información monitoreada [10]. En la figura 14, se muestra la interface de acceso a la plataforma SOLAR MANAGER.

and the second s

Figura 14. Sistema de identificación por usuario.

En el servidor CLOUD, se establece una base de datos a través de PostgreSQL que permite alojar la información procesada por el ARDUINO MEGA, con una frecuencia de adquisición de datos de un minuto. El estándar IEC-61724 establece que la frecuencia de muestreo puede ser superior a un minuto e inferior a diez minutos [11].

En la Figura 15, se muestra la configuración interna de la base de datos implementada en la plataforma.



Figura 15. Configuración de la base de datos en PostgreSQL

La base de datos incluye un código de ciudad, provincia, fecha, hora, usuario y código de la instalación fotovoltaica a monitorear. Asimismo, presenta los campos que albergan las magnitudes de la información obtenida en cada uno de los dispositivos monitoreados, que componen el sistema fotovoltaico.

4. Resultados

La implementación de la plataforma SOLAR MANAGER, Plataforma CLOUD de adquisición, tratamiento y visualización de información de sistemas fotovoltaicos aislados, permite adquirir información de las magnitudes eléctricas de un sistema de generación fotovoltaico.

De esa manera, el usuario tiene la capacidad de monitorear los valores medidos a través de Internet. La plataforma implementada ofrece varias opciones de visualización de los valores de los datos adquiridos de las mediciones realizadas en forma remota, Figura 16.



Figura 16. Opciones de visualización de las variables monitoreadas.

El usuario tiene la facilidad de monitorear un parámetro inicial, lo que implica la visualización del comportamiento de una sola variable del sistema de generación renovable. La opción comparativa permite al usuario escoger entre tres diferentes magnitudes a monitorizar.

En la Figura 17, se visualiza la magnitud de voltaje del panel y de la batería, así como la corriente de la batería. Los valores medidos permiten calcular la potencia generada por el sistema fotovoltaico en un determinado periodo de tiempo, indicando la energía proporcionada por la instalación fotovoltaica.

5. Conclusiones

El monitoreo de variables eléctricas a través de una plataforma CLOUD COMPUTING permite conocer el estado de operación y funcionamiento en tiempo real de sistemas fotovoltaicos aislados. La implementación de una plataforma de monitoreo en la nube es una potente herramienta de visualización de la información de las magnitudes eléctricas, facilitando las acciones de operación, control y mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas aisladas.



Figura 17. Comparación de los voltajes del sistema de generación fotovoltaico.

La característica más innovadora de la plataforma implementada SOLAR MANAGER es que se integra en un modelo CLOUD COMPUTING híbrido, basada en la programación de código abierto. La plataforma CLOUD SOLAR MANAGER de adquisición, tratamiento y visualización de monitoreo remoto de instalaciones fotovoltaicas presenta las siguientes ventajas:

- Reducción de consumo energético y costes del equipo.
- Acceso remoto.
- Actualizaciones automatizadas.
- Altas opciones de almacenamiento escalable.
- Mejora del sistema a través de la programación Open Source.
- Capacidad de configuración personalizada de funcionalidades de la plataforma.

La Plataforma SOLAR MANAGER de la Universidad Técnica de Ambato presenta de forma gráfica los valores medidos en forma remota y proporciona una rápida apreciación del estado actual de los componentes del sistema de generación fotovoltaico. Asimismo, permite desplegar registros de los valores medidos durante un tiempo establecido por el usuario, similares a los sistemas comerciales de monitoreo de sistemas fotovoltaicos.

El análisis gráfico de las variables monitoreadas facilita el estudio del rendimiento energético de los módulos fotovoltaicos. Además, permite conocer los valores de generación de la instalación fotovoltaica y el consumo energético de los usuarios.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consorcio Ecuatoriano para el Desarrollo de Internet Avanzado, CEDIA y a la Dirección de Investigación y Desarrollo, DIDE, de la Universidad Técnica de Ambato por su especial apoyo en el desarrollo de la presente propuesta, gracias a la financiación del proyecto CEPRA VIII – 2014 - 05: «Diseño e instalación de un sistema remoto de monitoreo de evaluación y análisis del comportamiento de instalaciones fotovoltaicas en el Ecuador».

Referencias

- S. Manzano, R. Peña, D. Guevara, and A. Ríos, "A cloud scalable platform for monitoring isolated PV systems using wireless remote sensors in Ecuador", Agosto 2014.
- [2] H. Schulzrinne, N. Hyunwoo, and J. Janak, "Connecting the physical world with Arduino", Department of Electrical Engineering Columbia University New York, NY, 2012.
- [3] E. Sánchez, "Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino", Mater's thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [4] F. Milton, G. Pérez, F. Gustavo, F. López, and D. Rivas, "Diseño e implementación de software y hardware de un registrador de variables eléctricas con comunicaciones Ethernet basado en tecnología Arduino y sistema de supervisión HMI", Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, sede Latacunga, 2012.
- [5] P. Rajeev, "Internet of Things: Ubiquitous home control and monitoring system using android based smart phone", International Journal of Internet of Things, 2(1): 5-11, 2013.
- [6] M. Karthikeyan, V. Saravanan, and S. Vijayakumar, "Cloud based automatic street light monitoring system", In Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), International Conference on pages 1-6, 2014.
- [7] J. Fahringer, S. Ostermann, R. Prodan, M. Yigitbasi, and A. Iosup, "Performance analysis of cloud computing services for many-tasks computing", IEEE trans, on parallel and Distributed Systems, Vol. 22, Issue 6, pp 931-945., 2011.
- [8] M. Eleuldj and M. Sefraqui, "Openstack: Toward an open-source solution for cloud computing", International Journal of Computer Applications (0975, 8887) Volume 55, No. 03, October 2006.
- [9] Digi, 2012. Xbee S2 Quick reference guide, Technical report, Diponible en: http://tunnelsup.com, 2012.

- "Plataforma Cloud para monitoreo remoto de sistemas fotovoltaicos aislados en el Ecuador", Maskana, diciembre, 2014.
- [10] S. Manzano, D. Guevara, and A. Ríos, [11] ----, "A new architecture proposal for PV remote monitoring based on IoT and cloud computing", Renewable Energy & Power Quality Journal, RE&PQJ, marzo, 2015.



CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO DE AIRE EN COLINAS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE PARQUES EÓLICOS

CHARACTERIZATION OF AIR FLOW IN HILLS FOR EMPLACEMENT OF WIND FARMS

Fran Reinoso-Avecillas^{1,*}, Nelson Jara-Cobos¹, Pablo Gómez-del Pino² y

César Nieto-Londoño³

Resumen

Este artículo presenta el análisis del comportamiento de flujo de aire sobre una colina en la zona inferior de la capa límite atmosférica, empleando un software de propósito general de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Mediante un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en las simulaciones y los datos experimentales disponibles de colinas estandarizadas con diferentes topografías; se ha logrado validar convenientemente el procedimiento de simulación. A continuación; se simuló bidimensionalmente el fluio de aire sobre una loma real: se compararon los resultados numéricos con estudios científicos similares y de manera puntual con los datos de operación del parque eólico instalado en el sitio, logrando caracterizar con cierto grado de detalle el campo de velocidades y de energía cinética turbulenta a lo largo del dominio; además de obtener coincidencias cercanas en cuanto su magnitud con variaciones en el orden de 1 a 2 m/s para la velocidad horizontal media.

Palabras clave: energía eólica, aerogenerador, dinámica de fluidos computacional, flujo de aire, simulación.

Abstract

This article presents the analysis of the behavior of air flow on a hill in the bottom of the atmospheric boundary layer, using a general purpose software Computational Fluid Dynamics (CFD). Through a comparative analysis of the results of the simulations and the experimental data with different topographies standardized hills available; It has been achieved conveniently validate the simulation procedure. Next; is two-dimensionally simulated air flow over an actual ridge; the numerical results with similar scientific studies and in a timely manner with the operating data of wind farm installed on site, achieving characterize with some detail the velocity field and turbulent domain along the kinetic energy is compared; plus get close coincidences as its magnitude with variations in the order of 1 to 2 m/s for the average horizontal velocity.

Keywords: Wind Power, Wind Turbine, Computational Fluid Dynamics, wind flow, Complex Terrain.

Recibido: 08-12-2015, aprobado tras revisión: 23-05-2016.

Forma sugerida de citación: Reinoso, F.; Jara, N.; Gómez, P.; Nieto, C. (2016). «Caracterización del flujo de aire en colinas para el emplazamiento de parques eólicos». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 17-26. ISSN: 1390-650X.

^{1,*}Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación y Toma de Decisiones GID – STD. Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador. Autor para correspondencia ⊠: freinoso@ups.edu.ec

²Departamento de Mecánica. Universidad Nacional de Educación a Distancia – España.

³Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia.

1. Introducción

El flujo del viento se ve afectado por factores como la rugosidad y la topografía del terreno, que tienden a producir perturbaciones en su movimiento. La presencia de lomas, por ejemplo, puede ser por un lado beneficiosa ya que la velocidad del viento aumenta al llegar a la cima, pero por otro lado, pendiente abajo de la colina, la turbulencia se ve incrementada; y se pueden producir efectos de recirculación. Este comportamiento no permite conocer con detalle el desarrollo de los perfiles de velocidad y la energía cinética turbulenta del viento; por lo que existe en la actualidad un gran interés sobre el estudio del flujo de aire en lomas o terrenos complejos.

1.1. Flujo de aire en terrenos homogéneos

La velocidad del viento en terrenos homogéneos; depende principalmente de la resistencia que presente la superficie del terreno a su paso y cuyo perfil logarítmico de velocidad está totalmente definido para la capa de la troposfera; está representado como u(z) [1], [2], [3], [4] y responde a la Ecuación 1.

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi\left(\frac{z_0}{L}\right) \right]$$
(1)

Donde,

- u(z) = velocidad del viento a la altura z por encima de la superficie del suelo.
- $u^* =$ velocidad de fricción.
- $\tau =$ esfuerzo superficial y ρ la densidad del aire; donde $\tau = \rho u^2.$
- k = constante de Von Karman, que generalmente toma el valor de 0.40 [5].
- L =longitud de Monin-Obukhov.
- Ψ = función universal adimensional del perfil, que depende de la estabilidad atmosférica.

1.2. Flujo de aire en terrenos no homogéneos

Un terreno no homogéneo, se caracteriza por tener una amplia zona horizontal no uniforme, que en general dan lugar a la formación de colinas y valles. En este caso, el comportamiento del flujo de aire en la capa límite atmosférica se ve influenciada por los diferentes accidentes que posee el terreno; generando variaciones en su dimensión, gradientes de temperatura, y la adhesión de nuevos flujos considerados como turbulentos. En consecuencia; la presencia de distintos tipos de topografía de terreno afecta de manera particular al desarrollo de los perfiles de velocidades y de energía cinética turbulenta del flujo de aire [4], [6], [7].

Para su estudio, los autores Gripphins y Middelton presentan una estandarización de lomas en dos dimensiones (Fig. 1), que responden a la función paramétrica de comportamiento senoidal de acuerdo con la Ecuación 2.



Figura 1. Perfil vertical de velocidades [4].

$$z_s = \begin{cases} \frac{H}{2} \left[1 + \cos \frac{\pi x}{2L} \right], & -2L < x < 2L \\ 0, & |x| \ge 2L \end{cases}$$
(2)

El parámetro de estandarización es la relación H/L, donde H es la altura de la loma, L es la longitud de la loma; de esta manera, se definen cuatro lomas estándar con los siguientes valores de H/L: 0.75; 1; 2; y 4, la altura típica referencial del modelo es de H = 60 m [8].

En los valles, el aire caliente se eleva y genera una zona de baja presión, haciendo que el aire más fresco ascienda ladera arriba, es lo que se conoce como viento de valle. La estandarización de los valles sigue criterios similares a las lomas en función de los parámetros H y L. Según los estudios realizados por Maurizi, se definen como valles poco profundos cuando la relación media de H/L = 0.25 y valles profundos en los cuales se presenta una relación media semejante a H/L = 0.66 [9].

1.3. Ecuaciones de gobierno del flujo

Para el estudio de flujo de aire sobre colinas se han desarrollado una variedad de modelos y técnicas numéricas, que interpretan y resuelven las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos como son la conservación de la masa, la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, para flujo viscoso representadas en las ecuaciones de Navier-Stokes, Ecuación 3, 4 [10], [11].

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\nabla \cdot V \right) = 0 \tag{3}$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}' + \rho f \tag{4}$$

1.4. Turbulencia

La turbulencia puede ser caracterizada como el movimiento caótico del fluido; su incremento está en directa dependencia de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el fluido [12]. La energía cinética k de los remolinos de mayor escala fluyen

hacia los de menor escala a través de un mecanismo de cascada y está dada por el coeficiente de disipación ϵ de la energía cinética k [13]. La intensidad de turbulencia (I), se define como la relación entre desviación estándar y la media de los datos correspondientes a las series de velocidad de viento en un período de tiempo corto (no mayor a una hora) y por convención usualmente igual a diez minutos [14]. Considerando una desviación estándar $\sigma_u = 2.5 \, u^*$ cerca del suelo se obtiene el siguiente modelo de la turbulencia, como se muestra en la Ecuación 5.

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \tag{5}$$

Donde,

 \bar{u} = velocidad media del viento. σ_u = desviación estándar.

1.5. Modelo de turbulencia $k - \epsilon$ estándar

El modelo de turbulencia $k - \epsilon$ propuesto originalmente por Launder y Spalding y ampliamente utilizado debido a su robustez y economía en la resolución de flujos relativamente simples; incorpora dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que interrelacionan la energía cinética del fluido turbulento k y su velocidad de disipación ϵ [2], [3], [15], [16].

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{\bar{v}} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$
(6)
$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{h} \tau_{\bar{v}} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{h}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right]$$

Donde la Ecuación 6 representa el transporte de la energía cinética k y la Ecuación 7, es la ecuación de la velocidad de disipación ϵ , respectivamente.

 $C_{\mu}, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \sigma_k, \sigma_{\epsilon}$; son el conjunto de constantes de identificación, que para el modelo estándar se han fijado los siguientes valores por defecto: $C_{\mu} = 0.09$; $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_{2\epsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_{\epsilon} = 1.3$.

2. Materiales y métodos

2.1. Características del problema a simular para la validación

Se realizó la validación del procedimiento mediante la simulación del flujo de aire sobre la colina de Askervein, usando para ello el paquete computacional *Ansys Fluent*. Mediante simulaciones bidimensionales 2D aplicadas a las secciones A-A y AA-AA, con una longitud transversal aproximada de 2 km como se muestra en la Figura 2, se compararon satisfactoriamente los datos

experimentales de la colina de Askervein con los resultados numéricos de la simulación [17].



Figura 2. Topografía colina de Askervein – líneas referenciales [17].

2.2. Características de la zona de estudio

La zona de interés está situada al sur de Ecuador, con coordenadas UTM: N9558404, E693030 y N9556225, E693635; en donde se encuentra instalado el Parque Eólico Villonaco a 2720 m sobre el nivel del mar; cuenta con 11 aerogeneradores tripala de eje horizontal de 1.5 MW de potencia; con altura de buje de 65 m, y una capacidad de generación total de 16.5 Mw [18], [19].



Figura 3. Ubicación de la zona de estudio [18].

2.3. Modelado del problema

2.3.1. Software utilizado

En la generación de la superficie del modelo, se utilizó el software Autodesk Inventor Series V 14, y la simulación del problema mediante el paquete Fluent de ANSYS, para resolver las ecuaciones de Navier Stokes sobre la malla.

2.3.2. Software utilizado

El modelo físico de la colina de Askervin, tiene una longitud L = 6000 m y una altura máxima H = 459 m. Se genera el dominio computacional que contenga a la loma, con una altura 6 H, y una longitud de 10 H a partir del perfil obtenido; como se observa en la Figura 4. Un procedimiento similar se sigue para la generación del modelo físico de la colina del sitio de interés.



Figura 4. Dimensiones del dominio computacional de la colina estudiada.

2.3.3. Generación de la malla

Se utiliza una malla no estructurada de volúmenes finitos en forma de tetraedros a partir de 15 m por encima del suelo y hasta 600 m (parte superior de frontera), donde suponemos que la superficie tiene poco efecto sobre el flujo y la condición de estabilidad es neutral. Desde la superficie (suelo) a la parte inferior de la rejilla no estructurada, se utilizó una rejilla prismática estructurada para refinar la región dentro de los primeros 15 m sobre el suelo, y las mallas no estructuradas se vieron obligadas a coincidir en 15 m de altura (Fig. 5). Dentro de esta región de 15 m, se definen cinco estratos estructurados con diferentes alturas de las rejillas ΔZS que se fusionaron con la red no estructurada anterior.



Figura 5. Mallado 2D de dominio computacional de colina Askervin.

Para el sitio de interés (Fig. 6); se ha generado una malla en dos dimensiones 2D, con 106 086 nodos y 105 079 elementos. Los elementos de la malla son tetraedros para toda la superficie con tamaño fino.



Figura 6. Mallado 2D del dominio computacional del sitio de interés.

2.3.4. Condiciones de contorno

Las propiedades de cada frontera del dominio computacional determinadas, tanto para el modelo Askervin como para el sitio de interés, se presentan en la Tabla 1. El valor de altura de rugosidad de la superficie $z_0 = 0.03$ m.

Tabla 1. Condiciones de contorno para línea A-A-Askervin.

Nombre de	de Variable Datos		
Arista	característicos		
Inlet	Velocity-inlet	Velocidad: 9 m/s Intensidad de turbulencia: 9% Longitud de escala 1m.	
Outlet Pressure-Outlet		Intensidad de turbulencia: 9 % Longitud de escala: 1 m.	
Perfil	Wall	Rugosidad del terreno: 0.02 m.	
Cielo	Wall	Tensión: constante	

2.3.5. Modelado de turbulencia

El modelo de turbulencia utilizado para este trabajo es $k - \epsilon$; conveniente para flujos geofísicos turbulentos con número de Reynolds alto [15]. Las constantes usadas corresponden al modelo estándar: $C_{\mu} = 0.09$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_{\epsilon} = 1.3$; $\sigma_{\epsilon 1} = 1.44$ y $\sigma_{\epsilon 2} = 1.92$.

3. Resultados

3.1. Validación del procedimiento

Se realizó mediante la simulación numérica de dos casos de colinas con datos conocidos. Para el primer caso de la colina de Askervin; con lo cual se pretende validar el procedimiento de simulación en todo el dominio; y para el segundo caso de estudio de una colina alargada de dimensiones normalizadas planteada por Rokones y Krostad; para verificar el comportamiento del desarrollo de los perfiles de velocidad horizontal y energía cinética turbulenta a lo largo de la colina en función de la variación de la pendiente de la misma.

3.2. Simulación numérica del flujo de aire en la colina de Askervin. Sección A-A

Una vez que la solución ha convergido, en la Figura 7 se presentan los resultados con los contornos de la componente horizontal de la velocidad en todo el dominio, en donde se puede apreciar el valor mínimo 0 m/s en todo el perfil de la colina y el máximo 14.65 m/s en la cima de la colina. En la Figura 8 se muestran los contornos de energía cinética turbulenta, con un valor mínimo de 0.002 J/kg y un valor máximo de 0.395 J/kg.



Figura 7. Contornos de velocidad en el dominio – colina de Askervin sección A-A.



Figura 8. Contornos de energía cinética turbulenta en el dominio – colina de Askervin sección A-A.

En la Figura 9, se muestran los resultados presentados por los autores Forthofer y Butler [17] a una altura de 10 m del suelo, para la colina de Askervin. Se trata de una comparación entre valores obtenidos experimentalmente y resultados numéricos correspondientes a un método basado en la conservación de la masa y un método de tipo CFD.



Figura 9. Velocidades de viento de colina Askervin sección A-A [17].

Los resultados numéricos correspondientes al método CFD de la Figura 9; son comparados con los obtenidos en este trabajo, observando un grado de acuerdo muy bueno, con errores en el orden de 1 m/s; como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Comparación entre resultados numéricos de velocidad *vs.* datos experimentales para Askervin- sección A-A.

Siguiendo el mismo procedimiento establecido en el análisis de la velocidad del flujo de aire sobre la colina de Askervin; en la Figura 11 se presenta el comportamiento de la energía cinética turbulenta.



Figura 11. Perfiles de energía cinética turbulenta – colina de Askervin sección A-A [17].

En la Figura 12, se muestra una comparación entre los resultados numéricos correspondientes a la energía cinética turbulenta obtenidos en este trabajo y los valores experimentales presentados por Forthofer y Butler. En la cual se aprecia un grado de acuerdo relativamente bueno. Las principales diferencias se producen en la zona de pendiente debajo de la colina.



Figura 12. Comparación entre resultados numéricos de velocidad *vs.* datos experimentales para Askervin sección A-A.

Para completar el proceso de validación del procedimiento, se procede a la simulación numérica del flujo en una colina alargada (caso I) del modelo propuesto por Rokones y Krogstad [20]; que tiene por objeto realizar una validación más completa, tanto en la cima como en el valle de la colina, cuyas características se definen en la Tabla y cuyo perfil se muestra en la Figura 13.

Tabla 2. Condiciones de contorno para línea A-A-Askervin.



Figura 13. Dimensiones de la colina propuesta por Rokenes y Krogstad [20].

Se procede a determinar el dominio computacional de la colina del Caso I, con las dimensiones que se muestran en la Figura 14.



Figura 14. Dimensiones de la colina propuesta por Rokenes y Krogstad [20].

Se generó una malla 2D con las condiciones de entrada del flujo de 10.7 m/s a una altura de 300 m y la rugosidad de terreno de 0.2 m. La turbulencia tiene una intensidad de 9 % a una longitud de escala 1 m.

El modelo de turbulencia utilizado es $k - \epsilon$ estándar. Los contornos de la componente horizontal de

la velocidad y de la energía cinética turbulenta resultantes del proceso de simulación se pueden observar en las Figuras 15 y 16. Las velocidades máximas son de 15.8 m/s y la energía cinética turbulenta está en el orden de 2.40 J/kg.

Del análisis del desarrollo de los perfiles de velocidad y energía cinética turbulenta en cuatro posiciones estratégicas a lo largo del perfil de la colina y coincidentes con las posiciones establecidas en el Caso I: $(X/H_1 = 0.04; 0.9; 1.91; y 4.91)$; se observa que la velocidad media, presenta un comportamiento creciente a medida que se avanza pendiente arriba de la colina hasta llegar a su máximo en la cima. En la meseta de la loma, la velocidad permanece constante.

Como se observa en las Figuras 17, 18 y 19; para la posición $X/H_1 = 1.91$ que corresponde a la cima de la colina, se tienen variaciones máximas de $U/U_r \approx 0.22$, que corresponde a la velocidad media absoluta de 2.35 m/s. En la posición $X/H_1 = 4.91$ en la meseta de la colina, se tienen variaciones máximas de $U/U_r \approx 0.20$, que corresponde a la velocidad media absoluta de 2.14 m/s. Con esta comparación muestra un grado de acuerdo razonablemente bueno, entre los valores experimentales y los resultados numéricos.

En cuanto a la energía cinética turbulenta; se obtienen comportamientos similares a lo largo del perfil de la colina hasta prácticamente el final de la meseta; en cuanto al desarrollo de los perfiles, para todos los puntos de medición se observan un incremento en la turbulencia a medida que se acerca al suelo, lo que confirma en su totalidad los criterios planteados por Rokones y Krogstad, en su estudio del flujo de aire sobre colinas.



Figura 15. Contornos de velocidad en el dominio colina Caso I.



Figura 16. Contorno de energía cinética turbulenta en el dominio colina Caso I.



Figura 17. Comparación de resultados numéricos de velocidad *vs.* experimento de caso I.



Figura 18. Comparación de resultados numéricos de velocidad vs. experimento de caso II.



Figura 19. Comparación de resultados numéricos de velocidad *vs.* experimento de caso III.

3.3. Simulación del sitio de interés

Se realizó el estudio del flujo de aire sobre la colina seleccionada, mediante varias simulaciones bidimensionales del sitio de interés; para obtener información sobre el comportamiento de la velocidad y la intensidad de turbulencia a lo largo de la colina y comparar dichos resultados numéricos con estudios realizados sobre este tema. En la Figura 20, se ha establecido las dimensiones de la colina del sitio de interés; con una de sus principales características de H/L = 0.75 y pendiente de 23.5°. En la Figura 21, se muestra los puntos de análisis a lo largo del perfil de la loma; para los perfiles de velocidad y energía cinética turbulenta.



Figura 20. Dimensiones generales.



Figura 21. Ubicación de puntos de análisis a lo largo del perfil de la loma.

En la Figura 22, se presentan los resultados de contornos de la componente horizontal de la velocidad en todo el dominio, en donde se puede apreciar el valor máximo alrededor de 9.81 m/s correspondientes a la cima de la colina.



Figura 22. Contornos de velocidad en el dominio de sitio de interés.

El perfil de velocidades en X/D = 0, correspondiente a la cima de la colina; obtenido mediante la simulación, se muestra en la Figura 23. En la cual se ha identificado, además, los valores puntuales de velocidad medidos en el sitio de interés.



Figura 23. Perfil de velocidad en la cima de la colina X/D = 0 en sitio de interés.

Los perfiles de velocidades, pendiente arriba de la loma, representados en la Figura 24; son similares en cuanto a su forma; se puede observar que la velocidad tiene valores iniciales de 5.0 m/s. En la posición de máxima pendiente, es decir, a mitad de la colina el flujo todavía mantiene un retraso de u = 7.2 m/s para X/D = -4; llegando a valores máximos de 9.8 m/s en la cima en X/D = 0.



Figura 24. Perfil de velocidad en la cima de la colina X/D = 0 en sitio de interés.

Para los perfiles de velocidad pendiente abajo; no se tiene un patrón definido de comportamiento. La velocidad decrece a medida que aumenta la distancia con respecto al centro de la colina; se presentan cambios de dirección en la velocidad, dando lugar a la recirculación del flujo en el valle. La velocidad en la zona antes mencionada es de 5.8 m/s aproximadamente para X/D = 15; como se puede observar en la Figura 25.



Figura 25. Perfiles de velocidad pendiente abajo en sitio de interés para X/D = 4, X/D = 8 y X/D = 15.

Realizado un análisis similar al efectuado con la velocidad media; en la Figura 26 se muestran los contornos de energía cinética turbulenta a lo largo del dominio, con valores entre 0.003 J/kg a 0.597 J/kg.



Figura 26. Contornos de energía cinética turbulenta en el dominio del sitio de interés.

Se observa un aumento de la energía cinética turbulenta a medida que disminuye la altura hasta llegar a un valor máximo cerca del suelo, para luego disminuir. En la Figura 27 se muestra el perfil de energía cinética turbulenta en la cresta de la colina X/D = 0, con valores máximos de 0.17 m²/s².



Figura 27. Energía cinética turbulenta en la cima de la colina X/D = 0 para sitio de interés.

En cuanto a los perfiles de energía cinética turbulenta generados pendiente arriba, se puede observar perfiles homogéneos en las diferentes posiciones en la Figura 28. Los valores máximos registrados están en la posición X/D = -4 con un valor de 0.14 m²/s².



Figura 28. Perfiles de energía cinética turbulenta aguas arriba en sitio de interés para X/D = -4, X/D = -8 y X/D = -10.

El comportamiento de la intensidad de turbulencia pendiente arriba de la loma, de acuerdo con lo expuesto en el párrafo anterior; solo se incrementan en una capa delgada cerca del suelo, por debajo de $H \approx 120$ m. En esta zona existe una mayor producción de turbulencia media debido al mayor cizallamiento del flujo; por el contrario, a mayores alturas del suelo se da una disminución de la intensidad de la turbulencia permaneciendo prácticamente constante; afirmación que concuerda en su totalidad con el estudio de Rokenes y Krogstad.

En los perfiles de energía cinética turbulenta pendiente abajo (Figura 29); no se observa un comportamiento homogéneo, los valores son considerablemente más altos que para el caso de la energía cinética turbulenta pendiente arriba; dando lugar a la separación del flujo en el valle. El incremento de la turbulencia se presenta a alturas de H = 140 m del suelo, para las diferentes posiciones. La energía cinética turbulenta de la posición X/D = 15 tiene un valor de 0.26 m²/s²; aproximadamente dos veces mayor a la energía cinética turbulenta de la cresta y del resto del perfil de pendiente arriba de la colina en estudio.



Figura 29. Perfiles de energía cinética turbulenta pendiente abajo en sitio de interés para X/D = 4, X/D = 8 y X/D = 15.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado el estudio del flujo de aire sobre una colina que puede ser considerada como un terreno complejo; mediante simulaciones numéricas bidimensionales utilizando el paquete computacional *Ansys Fluent*; logrando describir el comportamiento del campo de velocidades y turbulencia correspondientes al sitio seleccionado para el estudio. Las principales conclusiones a partir de estos criterios se pueden resumir de la siguiente manera:

Se ha realizado simulaciones bidimensionales del flujo de aire sobre diversos elementos topográficos característicos de terrenos complejos, como son colinas y valles. Los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones ofrecen una buena coincidencia, en el comportamiento de los campos de velocidades y de energía cinética turbulenta a lo largo del dominio establecido.

El procedimiento de mallado aplicado al dominio computacional de las colinas analizadas, garantizan en buena medida la exactitud de los resultados obtenidos para los campos de velocidad y energía cinética turbulenta. El dominio computacional fue estratificado en dos sectores con diferentes refinamientos, se utilizó una malla no estructurada de volúmenes finitos en forma de tetraedros. Por otro lado, las simulaciones bidimensionales aplicadas, permitieron construir una malla más fina a costos computacionales convenientes.

El modelo de turbulencia $k - \epsilon$ utilizado en las distintas simulaciones para caracterizar la turbulencia de las colinas o sitios estudiados que de acuerdocon los resultados alcanzados, resulta ser un modelo consistente para el estudio de la turbulencia en terrenos complejos.

La validación del procedimiento utilizado para el estudio del campo de viento sobre el sitio seleccionado se llevó a cabo mediante simulaciones bidimensionales en emplazamientos con datos conocidos. Los resultados numéricos obtenidos ofrecen resultados con coincidencias bastante cercanas, tanto para el campo de velocidades como para la energía cinética turbulenta; razón por la cual, se puede afirmar que el procedimiento establecido es conveniente para el estudio del campo de viento en colinas.

Se ha realizado las simulaciones del cerro «Villonaco» ubicado al sur de Ecuador; en donde se encuentra operando un parque eólico que lleva el mismo nombre y que, por sus características la colina en mención, puede ser considerada como un terreno complejo. Las simulaciones realizadas, han permitido caracterizar con cierto grado de detalle el flujo de aire en la zona.

Referencias

- A. E. Kasmi and C. Masson, "An extended k ε model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 1, pp. 103 – 122, 2008.
- [2] R. Abajo Gálvez, "Análisis del desarrollo de la estela de un aerogenerador en terrenos complejos," Trabajo de fin de máster, ETS - Ingenieros Industriales UNED, España, 2011.
- [3] S. Finardi, G. Tinarelli, P. Faggian, and G. Brusasca, "Evaluation of different wind field modeling techniques for wind energy applications over complex topography," *Journal of Wind En*gineering and Industrial Aerodynamics, vol. 74-76, pp. 283 – 294, 1998.

- [4] O. Gauravy and V. Sharad, "A review of computer models for wind flow over mountainous terrain," in *International Conference on Environmental Fluid Mechanics (ICEFM)*, India, 2005, pp. 151–157.
- [5] C. G. Justus, Vientos, rendimiento del sistema y del viento. The Franklin Institute Press, 1978.
- [6] J. Kaimal and J. Finnigan, Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. Oxford University Press, 1994.
- [7] G. Teneler, "Wind flow analysis on a complex terrain: a reliability study of a CFD tool on forested area including effects of forest module," Master of Science Thesis, Gotland University, 2011.
- [8] A. Griffiths and J. Middleton, "Simulations of separated flow over two-dimensional hills," *Journal* of wind engineering and industrial aerodynamics, vol. 98, no. 3, pp. 155–160, 2010.
- [9] A. Maurizi, "Numerical simulation of turbulent flows over 2-D valleys using three versions of the k – ε closure model," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 85, no. 1, pp. 59 – 73, 2000.
- [10] J. D. Anderson and J. Wendt, Computational fluid dynamics. Springer, 1995, vol. 206.
- [11] J. D. Walshe, "CFD modelling of wind flow over complex and rough terrain," Ph.D. dissertation, Loughborough University, 2003.
- [12] J. Hunt, F. Tampieri, W. Weng, and D. Carruthers, "Air flow and turbulence over complex terrain: a colloquium and a computational workshop," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 227, pp. 667–688, 1991.
- [13] J. A. Capote, D. Alvear, O. V. Abreu, M. Lázaro, and P. Espina, "Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización

espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales," *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 24, no. 3, pp. 227–245, 2008.

- [14] W. Gómez and L. Llano, "Simulación del viento atmosférico y aplicación experimental," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 16, no. 1, pp. 5–14, 2006.
- [15] J. M. Prospathopoulos, E. S. Politis, K. G. Rados, and P. K. Chaviaropoulos, "Evaluation of the effects of turbulence model enhancements on wind turbine wake predictions," *Wind Energy*, vol. 14, no. 2, pp. 285–300, 2011.
- [16] J. O'Sullivan, R. Pecnik, and G. Iaccarino, "Investigating turbulence in wind flow over complex terrain," in *Proceedings of the Summer Program*, Stanford University, 2010, pp. 129–139.
- [17] J. Forthofer and B. Butler, "Differences in simulated fire spread over askervein hill using two advanced wind models and a traditional uniform wind field," in *The Fire environment – Innovations, Management, and Policy*, B. Butler and W. Cook, Eds., Rocky Mountain Research. Destin, FL: United States Department of Agriculture, 26-30 March 2007, pp. 123–127.
- [18] H. G. Ollague-Armijos and H. E. Crespo-Azanza, "Estudio y evaluación de los parámetros de operación del proyecto eólico Villonaco de la provincia de Loja – Ecuador," Trabajo de conclusión de curso, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2014.
- [19] CELEC. Redición de cuentas 2014. CELEC. Cuenca, Ecuador. [Online]. Available: https: //www.celec.gob.ec/
- [20] K. Rokenes, "Investigation of terrain effects with respect to wind farm siting," Ph.D. dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2009.



Uso de métodos multicriterio de toma de decisiones para la selección de biomasa en reactores Fischer Tropsch

USE OF MULTICRITERIA DECISION MAKING METHODS FOR BIOMASS SELECTION IN FISCHER TROPSCH REACTORS

Javier Martínez-Gómez^{1,*}

Resumen

La elección adecuada de un combustible es una tarea importante para cumplir con los requisitos de un biorreactor. El número de combustible de biomasa con diferentes propiedades disponibles para proporcionar a un biorreactor es enorme. Sin embargo, la aplicación de aproximaciones matemáticas eficientes y sistemáticas puede lograr la evaluación. El uso de métodos multicriterio de toma de decisiones (MCDM) que consideran propiedades características y criterios cualitativos para asignar importancia a cada alternativa tiene el fin de seleccionar la mejor opción. Esta investigación se basa en el uso MCDM para la selección del combustible para un reactor de Fischer Tropsch. Los métodos MCDM implementados son la evaluación proporcional compleja de alternativas con las relaciones grises (COPRAS-G), análisis operativo de calificación y competitividad (OCRA), una evaluación de relación de aditivos (ARAS), técnica para el orden de preferencia por similitud con solución ideal (TOPSIS). La ponderación de los criterios se realizó por el proceso analítico jerárquico (AHP) y el método de entropía. Los resultados muestran que el arroz blanco es la mejor opción para un combustible de biomasa para los cinco MCMD.

Palabras clave: Biomasa, biocombustibles, métodos multicriterio de decisión.

Abstract

Proper choice of a fuel is an important task to fulfill the requirements for a bioreactor. The number of biomass fuel with different properties available to provide to a bioreactor is vast. However, application of efficiency and systematic mathematical approaches may achieve the evaluation. Multi-criteria decision making methods (MCDM) considers characteristic properties and qualitative criteria to assign importance to each alternative in order to select the best option. This research use MCDM for the selection of the fuel for a Fischer Tropsch reactor. The MCMD methods implemented are complex proportional assessment of alternatives with gray relations (COPRAS-G), operational competitiveness rating analysis (OCRA), a new additive ratio assessment (ARAS), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) and SMART methods. The criteria weighting was performed by compromised weighting method composed of AHP (analytic hierarchy process) and Entropy methods. The results illustrated white grain appear has the best choice for a biomass fuel for the five MCMD.

Keywords: Biomass, biofuel, multi-criteria decision making methods, MCDM.

 1,* Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), Quito – Ecuador. Autor para correspondencia \boxtimes : javier.martinez@iner.gob.ec, javiermtnezg@gmail.com

Recibido: 04-03-2016, aprobado tras revisión: 06-06-2016.

Forma sugerida de citación: Martínez, J. (2016). «Uso de métodos multicriterio de toma de decisiones para la selección de biomasa en reactores Fischer Tropsch». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 27-36. ISSN: 1390-650X.

1. Introducction

Biomass is a natural treasure for chemicals that up to now are made from fossil resources. Unfortunately, the heterogeneity and complexity of biomass still preclude exploitation of its full potential. New technologies for economical valorization of biomass are under development, but cannot yet compete with petrochemical processes. However, rising prices of fossil resources, inevitably will lead to replacement of oil refineries with other biorefineries or bioreactors.

The concern on impacts of global warming and decrease of the conventional fossil fuel sources enhance the interest to renewable energy sources. Biomass, containing all organic material that stems from plants. As a very versatile energy source, biomass can be used in transport, electricity and heating [1], [2]. Biomass, sun (e.g. photovoltaic solar cells and solar heat collectors), wind (e.g. wind turbines), water (e.g. hydropower, tidal energy) and geothermal resources are all sources of renewable energy, but biomass is the only renewable resource of carbon for the production of chemicals, materials and fuels. Before the onset of the petrochemical era, renewable feedstocks supplied a significant portion of the global chemical and energy needs [3], [4].

However, a study regarding to a fuel of a bioreactor. Multi criteria decision making methods (MCDM) appear as an alternative in engineering design due to its adaptability for different applications [5], [6]. The MCDM methods can be broadly divided into two categories, as (i) multi-objective decision-making (MODM) and (ii) multi-attribute decision-making (MADM). There are also several methods in each of the abovementioned categories. Priority-based, outranking, preferential ranking, distance-based and mixed methods are some of the popular MCDM methods as applied for evaluating and selecting the most suitable solution for diverse engineering applications. In most MCDM methods a certain weight is assigned to each criteria.

This paper solves the problem of selecting of a biomass fuel using recent mathematical tools and techniques for accurate ranking of the alternatives by five preference ranking- based MCDM methods, i.e. COPRAS-G, OCRA, ARAS, TOPSIS and VIKOR methods have been implemented. The criteria weighting was performed by compromised weighting method composed of AHP and Entropy methods. For these methods, a list of all the possible choices from the best to the worst suitable biofuel is obtained, taking into account different criteria.

2. Materials and Methods

2.1. Definition of the decision making problem

Biomass can be characterized by the Moisture content, Content of volatiles, Content of ashes, Elementary composition, Density, Energy density [7]. The elementary composition determines the heating value. Moisture content ranges between 10 and 60 % and also has a significant influence on the lower heating value (LHV). In general, it can be observed that biomass has inferior heating values compared to fossil fuels like black coal or crude oil.

The energy density with the SI-unit $[J/m^3]$ is defined with the lower heating value and the bulk density [8]. The bulk density is the space that for example wood logs or straw bales fill per kilogram. Biomass normally has a low bulk density, and together with the low heating values, its energy density is very small. As a result, the transport costs for biomass are high. It should therefore only be used in close proximity to its origin. This explains the decentralized character of energy generation from biomass: unlike fossil power plants, where high energy density fuel can be transported to central conversion plants with several megawatts up to a few gigawatts, the biomass to energy conversion takes place in small plants with power out-puts of 50 kW – 300 MW [9]. In case of electricity as secondary energy, conduction losses can be reduced. Another way is to produce secondary energy carriers like ethanol, biodiesel or second generation biofuels with higher energy density and transport them to the place of consumption.

One of the most important biomass property is considered to be the lower heating value (LHV), the highest values of which are desired in order to provide the most quantity of energy to a determine application. In addition, lower values of [%] Moisture Content (MC) would be favorable. Furthermore, higher densities (D) of the biomass can lead to a less volume of fuel. The lowest values of ash melting (AM) are necessary to eliminate the impurities. A high Ash dry and volatile components are which leads to higher conversion rates. Among these six criteria, the moisture content and ash melting, are a non-beneficial properties. Seven alternatives for the biomass fuel were taken into consideration: straw, wood, miscanthus, whole cereal, plants, cattle manure, rice husk, wheat grain. The properties of the biomass fuel alternatives are given in Table 1 and their average values were used.

3. Multi-criteria decision making methods

3.1. Criteria weighting

The criteria weights are calculated using a compromised weighting method, where the AHP and Entropy methods, in order to take into account the subjective and objective weights of the criteria and to obtain more reasonable weight coefficients.

	(LHV) LHV [MJ/kg]	(MC) Moisture Content [%]	${f (D)} \ {f Density} \ {f (kg/m^3)}$	(AM) Ash melting [°C]	(AD) Ash, dry [%]	(VD) Volatiles, dry [%]
Straw	18,25	15	67,5	1040	5	78
Wood	19,25	40	320	1150	2,1	77,5
Miscanthus	18,5	20	160	1040	3,2	81
Whole cereal plants	18,25	15	60	1550	5	78
Cattle manure	16,4	14	550	1304,5	$13,\!67$	60,5
Rice Husk	13,5	3,5	100	1505	12,7	67,9
Wheat grain	$16,\!66$	7	790	1035	$7,\!27$	15,2

Table 1. Material properties for a biomass fuel [1]-[12].

3.1.1. Analytic hierarchy process (AHP)

The AHP method was developed by Saaty [10] to model subjective decision-making processes based on multiple criteria in a hierarchical system. The method composes of three principles:

- a) Structure of the model.
- b) Comparative judgment of the alternatives and the criteria.
- c) Assessing consistency in results.

a) Structure of the model. In order to identify the importance of every alternative in an application, each alternative has been assigned a value. The ranking is composed by three levels: 1). general objective, b). criteria for every alternative, c). alternatives to regard [10]

b) Comparative judgment of the alternatives and the criteria. The weight of criteria respect to other is set in this section. To quantify each coefficient it is required experience and knowledge of the application. Saaty [10] classified the importance parameters show in Table 2. The relative importance of two criteria is rated using a scale with the digits 1, 3, 5, 7 and 9, where 1 denotes "equally important", 3 for "slightly more important", 5 for "strongly more important", 7 for "demonstrably more important" and 9 for "absolutely more important". The values 2, 4, 6 and 8 are applied to differentiate slightly differing judgments. The comparison among *n* criteria is resume in matrix A $(n \times n)$, the global arrange is expressed in equation (1).

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} a_{ii} = 1, a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0$$

$$(1)$$

Afterwards, from matrix A it is determined the relative priority among properties. The eigenvector w is the weight importance and it corresponds with the largest eigenvector (λ_{\max}) :

$$(A - \lambda_{\max}) w = 0 \tag{2}$$

The consistency of the results is resumed by the pairwise comparison of alternatives. Matrix A can be ranked as 1 and $\lambda_{\text{max}} = n$ [10].

c) Consistency assessment. In order to ensure the consistency of the subjective perception and the accuracy of the results it is necessary to distinguish the importance of alternatives among them. In equations (3) and (4) is shown the consistency indexes required to validate the results.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{3}$$

$$CR = \frac{CR}{RI} \tag{4}$$

Where

 $n{:}$ Number of selection criteria.

RI: Random index.

CI: Consistency index.

CR: Consistency relationship.

 $\lambda_{\max}(A)$: Largest eigenvalue.

The CR should be under 0,1 for a reliable result otherwise, the importance coefficient (1-9) has to be set again and CR recalculated (16). The RI is determined for different size matrixes, and its value is 1,32 for an 7x6 matrix.

3.1.2. Entropy method

Entropy method indicates that a broad distribution represents more uncertainty than that of a sharply peaked one [5]. Equation (5) shows the decision matrix A of multi-criteria problem with m alternatives and ncriteria:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}; x_1, x_2, \dots, x_n$$
(5)

where x_{ij} (i = 1, 2, ..., m; j = 1, 2, ..., n) is the performance value of the *ith* alternative to the *jth* criteria.

The normalized decision matrix P_{ij} is calculated (6), in order to determine the weights by the Entropy method.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}}$$
(6)

The Entropy value E_j of *jth* criteria can be obtained as:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, n$$
 (7)

where $k = \frac{1}{\ln m}$ is a constant that guarantees $0 \le E_j \le 1$ and m is the number of alternatives. The degree of divergence (d_j) of the average information contained by each criterion can be obtained from Eq. (8):

$$d_j = |1 - E_j| \tag{8}$$

Thus, the weight of Entropy of jth criteria can be defined as:

$$\beta_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \tag{9}$$

3.2. COPRAS-G method

COPRAS-G method [11] is a MCDM method that applies gray numbers to evaluate several alternatives of an engineering application. The gray numbers are a section of the gray theory to confront insufficient or incomplete information [11]. White number, gray number and black number are the three classifications to distinguish the uncertainty level of information.

The uncertainty level can be expressed by three numbers: white, gray and black. Let the number $\otimes X = [\underline{x}, \overline{x}] = \{x | \underline{x} \leq x \leq \overline{x}\}$ and $x \in \mathbb{R}$, where $\otimes X$ has two real numbers, \underline{x} (the lower limit of $\otimes X$) and \overline{x} (the upper limit of $\otimes X$) is defined as follows [11]:

- a) White number: if $\underline{x} = \overline{x}$, then $\otimes X$ has the complete information.
- b) Gray number: $\otimes X = [x, \overline{x}]$ means insufficient and uncertain information.
- c) Black number: if $\underline{x} \to \infty$ and $\overline{x} \to \infty$, then $\otimes X$ has no meaningful information.

The COPRAS-G method uses a stepwise ranking and evaluating procedure of the alternatives in terms of significance and utility degree. The procedure of applying COPRAS-G method is formulated by the following steps [11].

Step 1: Selection of a set of the most important criteria, describing the alternatives and develop the initial decision matrix, $\otimes X$.

$$\otimes X \begin{pmatrix} \otimes x_{11} & \otimes x_{12} & \cdots & \otimes x_{1n} \\ \otimes x_{21} & \otimes x_{22} & \ddots & \otimes x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \otimes x_{m1} & \otimes x_{m2} & \cdots & \otimes x_{mn} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} (x_{11}, b_{11}) & (x_{12}, b_{12}) & \cdots & (x_{1n}, b_{1n}) \\ (x_{21}, b_{21}) & (x_{22}, b_{22}) & \ddots & (x_{2n}, b_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (x_{m1}, b_{m1}) & (x_{m1}, b_{m1}) & \cdots & (x_{m,n}, b_{m,n}) \end{pmatrix}$$
(10)

where $\otimes x_{ij}$ is the interval performance value of *ith* alternative on *jth* criterion. The value of $\otimes x_{ij}$ is determined by x_{ij} (the smallest value or lower limit) and b_{ij} (the biggest value or upper limit).

Step 2: Normalize the decision matrix, $\otimes X$ using the following equations. Eq. (11) is applied for $\otimes x_{ij}$ or lower limit values, whereas, Eq. (12) is used for b_{ij} or upper limit values.

$$\otimes \bar{X} = |\bar{x}_{ij}|_{m \times n} = \frac{2x_{ij}}{\left[\sum_{j=1}^{n} x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}\right]} \quad (11)$$

$$\otimes \bar{X} = |\bar{b}_{ij}|_{m \times n} = \frac{2b_{ij}}{\left[\sum_{j=1}^{n} x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}\right]} \quad (12)$$

Step 3: Calculate the weights of each criterion. Step 4: Determine the weighted normalized decision matrix, $\otimes \overline{X}$ by mean of the equations (13) and (14).

$$\otimes \bar{X} = |\bar{x}_{ij}|_{m \times n} = \bar{x}_{ij} \times w_j$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$
(13)

$$\otimes \bar{\bar{X}} = |\bar{\bar{b}}_{ij}|_{m \times n} = \bar{b}_{ij} \times w_j \tag{14}$$

Step 5: The weighted mean normalized sums are calculated for both the beneficial attributes P_i based on equation (15) and non-beneficial attributes R_i based on equation (16) for all the alternatives.

$$P_{i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k} \left(\bar{\bar{x}}_{ij} + \bar{\bar{b}}_{ij} \right)$$
(15)

$$R_i = \frac{1}{2} \sum_{j=k+1}^n \left(\bar{\bar{x}}_{ij} + \bar{\bar{b}}_{ij} \right) \tag{16}$$

Step 6: Determine the minimum value of R_i .

$$R_{\min} = \min R_i = (i = 1, 2, \dots, m)$$
 (17)

Step 7: Determine the relative significances or priorities of the alternatives. The priorities of the candidate alternatives are calculated on the basis of Q_i with equation (18). The greater the value of Q_i , the higher is the priority of the alternative. The alternative with the highest relative significance value (Q_{max}) is the best choice among the feasible candidates.

$$Q_{i} = P_{i} + \frac{R_{\min} \sum_{i=1}^{m} R_{i}}{R_{i} \sum_{i=1}^{m} (R_{\min}/R_{i})}$$
(18)

Step 8: Determine the maximum relative significance value.

$$Q_{\max} = \max Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \tag{19}$$

Step 9: Calculate the quantitative utility (U_i) for ith alternative through the equation (20). The ranking is set by the Q_i .

$$U_i = \left[\frac{Q_i}{Q_{\max}}\right] \times \ 100\% \tag{20}$$

With the increase or decrease in the value of the relative significance for an alternative, it is observed that its degree of utility also increases or decreases. These utility values of the candidate alternatives range from 0% to 100%. The best alternative is assigned according to the maximum value 100 %.

3.3. OCRA method

The OCRA method was developed to measure the relative performance of a set of production units, where resources are consumed to create value-added outputs. OCRA uses an intuitive method for incorporating the decision maker's preferences about the relative importance of the criteria. The general OCRA procedure is described as below [12]:

Step 1: Compute the preference ratings with respect to the non-beneficial criteria. The aggregate performance of *ith* alternative with respect to all the input criteria is calculated using the following equation:

$$\bar{I}_{i} = \sum_{j=1}^{n} w_{j} \frac{\max\left(x_{j}^{m}\right) - x_{j}^{i}}{\min\left(x_{j}^{m}\right)}$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$
(21)

where \bar{I}_i is the measure of the relative performance of ith alternative and x_i^i is the performance score of *ith* alternative with respect to jth input criterion. If ithalternative is preferred to mth alternative with respect to *jth* criterion, then $x_j^i < x_j^m$. Then term $\frac{\max(x_j^m) - x_j^i}{\min(x^m)}$ indicates the difference in performance scores for criterion j, between ith alternative and the alternative whose score for criterion j is the highest among all the alternatives considered.

Step 2: Calculate the linear preference rating for the input criteria (\bar{I}_i) using equation (22):

$$\bar{\bar{I}}_i = \bar{I}_i - \min\left(\bar{I}_i\right) \tag{22}$$

Step 3: Compute the preference ratings with respect to the beneficial criteria. The aggregate performance for *ith* alternative on all the beneficial or output criteria is measured using the equation (23):

$$\bar{O}_i = \sum_{h=1}^{H} w_h \frac{x_h^i - \min(x_h^m)}{\min(x_h^m)}$$
(23)

where $h = 1, 2, \ldots, H$ indicates the number of beneficial attributes or output criteria and w_h is calibration constant or weight importance of *hth* output criteria. The higher an alternative's score for an output criterion, the higher is the preference for that alternative. It can be mentioned that $\sum_{j=1}^{n} w_j + \sum_{h=1}^{H} w_h = 1$. It was considered a $\sum_{h=1}^{H} w_h = 0,00375$ Step 4: Calculate the linear preference rating for the

output criteria (\bar{I}_i) using the equation (24):

$$\bar{\bar{O}}_i = \bar{O}_i - \min\left(\bar{O}_i\right) \tag{24}$$

Step 5: Compute the overall preference ratings (P_i) as follows in equation (25):

$$P_i = \left(\bar{\bar{I}}_i + \bar{\bar{O}}_i\right) - \min\left(\bar{\bar{I}}_m + \bar{\bar{O}}_m\right) \tag{25}$$

The alternatives are ranked according to the values of the overall preference rating. The best alternative is determined as the one with the minimum value of P_i .

3.4. ARAS method

The ARAS method is based on utility theory and quantitative measurements. The steps of ARAS method are as follows [13]:

Step 1: Determine the normalized decision matrix, using linear normalization procedure for beneficial attributes [13]. For non-beneficial attributes, the normalization procedure follows two steps. At first, the reciprocal of each criterion with respect to all the alternatives is taken as follows:

$$x_{ij}^* = \frac{1}{x_{ij}} \tag{26}$$

In the second step, the normalized values are calculated as follows:

$$[r_{ij}]_{m \times n} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*}$$
(27)

Step 2: Determine the weighted normalized decision matrix. D.

Step 3: Determine the optimality function (S_i) for *i*th alternative by means of the equation (28):

$$S_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \tag{28}$$

The optimality function S_i has a direct and proportional relationship with values in the decision matrix and criteria weights.

Step 4: Calculate the degree of the utility (U_i) for each alternative. The values of U_i is calculated by means of equation (29):

$$U_i = \frac{S_i}{S_0} \tag{29}$$

The utility values of each alternative range from 0 % to 100 %. The alternative with the highest U_i is the best choice among the alternatives.

3.5. TOPSIS method

The basic idea of TOPSIS is that the best decision should be made to be closest to the ideal and farthest from the non-ideal [14]. Such ideal and negative-ideal solutions are computed by considering the various alternatives. The highest percentage corresponds to the best alternative.

The TOPSIS approach is structured by the following procedure [14]:

Step 1: Normalize the decision matrix n_{ij} by is performed using the equation 30.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}}$$
(30)

Where x_{ij} is the performance measure of *jth* criterion respect to *ith* alternative.

Step 2: Sync the weight w_j and the normalized matrix n_{ij} , see equation (31).

$$V_{ij} = n_{ij} \cdot w_j$$
 $(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ (31)

Step 3: The ideal solutions (V^+) and nadir solutions (V^-) are determined using (32) and (33):

$$\{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} = \left\{ (\max_i V_{ij} | j \in K), \\ (\min_i V_{ij} | j \in K') \right\} \{i = 1, 2, \dots, m\}$$

$$(32)$$

$$\{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} = \left\{ (\min_i V_{ij} | j \in K), \\ \left(\max_i V_{ij} | j \in K' \right) \right\} \{i = 1, 2, \dots, m\}$$
(33)

Where K and K' are the index set of benefit criteria and the index set of cost criteria, respectively.

Step 4: The distance between the ideal and nadir solution is quantified. The two Euclidean distances for each alternative are computed as given by equations (34) and (35):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(V_{ij} - V_j^+\right)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (34)

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(V_{ij} - V_j^-\right)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (35)

Step 5: The relative closeness (C_i) is computed by equation (36).

$$C_{i} = \frac{S_{i}^{-}}{S_{i}^{-} + S_{i}^{-}} \quad i = 1, 2, \dots, m; \ 0 \le C_{i} \le 1 \quad (36)$$

The highest C_i coefficients correspond to the best alternatives.

3.6. SMART method

SMART is one of the simplest forms of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) [15]. It requires two assumptions, namely "utility independence and preferential independence". This method conveniently converts importance weights into actual numbers. The ranking value x_j of alternative A_j is obtained simply as the weighted algebraic mean of the utility values associated with it, i.e.

$$x_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$
(37)

Besides the above simple additive model, (37) also proposed a simple method to assess weights for each of the criteria to reflect its relative importance to the decision. First, the criteria are ranked in order of importance. Then, the next-least important criterion is chosen, more points are assigned to it, and so on, to reflect their relative importance. The final weights are obtained by normalizing the sum of the points to one.

3.7. Spearman's rank correlation coefficient

The Spearman's rank correlation coefficient measures the relation among nonlinear datasets. Its purpose is to quantify the strength of linear relationship between two variables. If there are no repeated data values, a perfect Spearman correlation of +1 or -1 occurs when each of the variables is a perfect monotone function of the other [16]. The Spearman's rank correlation is computed by equation (38).

$$R_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n\left(n^2 - 1\right)} \tag{38}$$

Where:

 R_s : Spearman's rank coefficient d_i : Difference between ranks of each case n: Number of pairs of values

4. Results

After the determination of the weights of different criteria using the AHP and Entropy methods, these weights were applied to the MCDM methods. The results has been established with COPRAS-G, OCRA, ARAS, TOPSIS and SMART methods. The results have been compared by means of Spearman's rank correlation coefficient in order to determine their convergence and sensibility and ranked the best solutions.

4.1. Criteria weighting

The comparison among properties of every alternative are in Table 1. The properties identification appears under the name of each property as (LHV), (MC), (D), (AM), (AD) and (VD). The weight of each alternative was established with AHP and Entropy methods. The criteria weighting was firstly implemented by the AHP method to obtain the subjective weights of different evaluation criteria. In Table 2 is can be showed the scale of relative importance used in the AHP method.

Table 2. Scale of relative importance.

Definition	Intensity of importance
Equal importance	1
Moderate importance	3
Strong importance	5
Very strong importance	7
Extreme importance	9
Intermediate importance	2, 4, 6, 8

In Table 3 and Table 4 is illustrated the decision matrix generated for a biomass fuel, which take into account the importance of each criteria. The most important criteria to generate the matrix was considered (LHV); slightly more important were taken (MC), and (D); strongly more important was considered (AM) and (AD); demonstrably more important were taken (VD). The results are consistent due to the value of the consistency index (CI = 0, 023) and the consistency ratio (CR = 0, 018) which are lower than the limit 0, 1. At the final step, the compromised weights of the criteria (w_i) were calculated using the Eq. (1). In Table 5, the weight coefficient of every criterion was determined based in results of AHP and Entropy methods. On one hand, the most representative values are (LHV) 61, 3. On the other hand, less than 39 % of the overall weight is distributed in (MC), (D), (AM), (AD) and (VD).

Table 3. Comparison among criteria for AHP Method.

(LHV)	(MC)	(D)	(AM)	(AD)	(VD)
1	3	3	5	5	7
0,333	1	1	3	3	5
0,333	1	1	3	3	5
$_{0,2}$	0,333	0,333	1	1	3
$_{0,2}$	0,333	0,333	1	1	3
$0,\!143$	0,2	0,2	0,333	0,333	1

Table 4. Normalized decision matrix P_{ij} for entropy method.

Material	(LHV)	(MC)	(D)	(AM)	(AD)	(VD)
1	0,332	0,286	0,05	0,296	0,217	$0,\!42$
2	0,35	0,762	0,239	0,327	0,091	0,417
3	0,337	0,381	0,119	0,296	0,139	$0,\!436$
4	0,332	0,286	0,045	$0,\!441$	0,217	$0,\!42$
5	0,55	0,133	$0,\!634$	0,339	0,348	0,189
6	0,298	0,267	0,41	$0,\!371$	0,594	0,326
7	0,246	0,067	0,075	0,428	0,552	0,366

Table 5. Criteria weighting by the AHP (α_j) and balanced scales entropy (β_j) , methods and compromised weighting (w_j) methods.

(LHV)	(MC)	(D)	(AM)	(AD)	(VD)
0,425	0,191	$0,\!191$	0,078	0,078	0,037
0,246	0,111	0,026	0,257	$0,\!155$	0,204
0,613	$0,\!125$	0,03	$0,\!118$	$0,\!071$	0,044

4.2. COPRAS-G

The related decision matrix is first performed from the gray numbers applied in COPRAS-G is illustrated in Table 6. Equations 15 and 16 allow to develop decision matrix with the weighted normalized, as is given in Table 7. Later, the normalized matrix and the weight are compared by means of equations 18 and 19. Table 8 exhibits the priority values (Q_i) and quantitative utility (U_i) values for the candidate alternatives for a biomass fuel, as calculated using equations (18) and (20) respectively. Table 8 also shows the ranking of the alternative fuels as 7-5-3-6-1-4-2. Wheat grain and cattle mature, obtain the first and second ranks respectively, in contrast wood has the worst choice.

4.3. OCRA

Firstly, the aggregate performance of each alternative with respect to all the input criteria is calculated with equation (21). Applying equation (23), the aggregate performance of the alternatives on all the beneficial or output criteria are then determined and subsequently, the linear preference ratings for the output criteria are calculated. Finally, the overall preference rating for each alternative fuel is determined using equation (25). The detailed computations of this method for a biomass fuel are presented in Table 9. In this method, the ranking fuel alternatives is obtained as 6-1-7-4-3-5-2, which suggests that Rice Husk attains the top rank. Straw is the second best choice and wood has the last rank.

In this method, the ranking fuel alternatives is obtained as 6-7-1-3-4-5-2. For this method it is revealed which the best alternative is rice husk and wheat grain is the second best solution as a fuel. In contrast wood has the last rank and cattle manure is the second last rank.

4.4. ARAS

Weighted normalized decision matrix for ARAS method, as given in Table 10, and using equations (28) the optimality function () for each of the fuel alternative is calculated. Then, using the equation (29) the corresponding values of the utility degree () are determined for all the alternatives. The values of and , and

Material	(LF	IV)	(M	[C)	(I	D)	(A	M)	(A	D)	(V	D)
1	$17,\!5$	19	10	20	24	111	900	1180	3	7	75	81
2	$18,\! 5$	20	20	60	40	600	1100	1200	$_{0,3}$	4	70	85
3	18	19	10	30	140	180	880	1200	1,5	5	78	84
4	$17,\!5$	19	10	20	25	95	1300	1800	3	7	75	81
5	$13,\!6$	19,2	12	16	450	650	1243	1366	$11,\!6$	$15,\!6$	$54,\!5$	66,5
6	12	15	2	5	86	114	1460	1650	5	$18,\! 5$	$60,\!6$	75,3
7	17	18,3	6	8	690	890	870	1220	6,3	8,3	10,4	20

 Table 6. Decision matrix of COPRAS-G method.

Table 7. Normalized matrix made of gray numbers.

Material	(LH	IV)	(M	[C)	(I	D)	(A	M)	(A	D)	(V	D)
1	0,088	0,096	0,011	0,022	0	0,002	0,012	0,016	0,004	$0,\!01$	0,007	0,008
2	0,093	0,101	0,022	0,065	0,001	0,016	0,015	0,016	0	0,006	0,007	0,008
3	$0,\!091$	0,096	0,011	0,033	0,002	0,026	0,012	0,016	0,002	0,007	0,008	0,008
4	0,088	0,096	0,011	0,022	0	0,004	0,018	0,024	0,004	$0,\!01$	0,007	0,008
5	0,068	0,097	0,013	0,017	0,007	0,015	0,017	0,018	0,017	0,023	0,005	0,006
6	0,061	0,075	0,002	$0,\!005$	0,007	0,018	$0,\!02$	0,022	0,007	0,027	0,005	$0,\!007$
7	0,086	0,092	0,007	0,009	$0,\!001$	$0,\!024$	$0,\!012$	0,017	0,009	$0,\!012$	0,006	0,002

.....

_

the ranking achieved by the biomass fuel alternatives are illustrated in Table 11.

In this method, the ranking fuel alternatives is obtained as 6-7-1-3-4-5-2. For this method it is revealed which the best alternative is rice husk and wheat grain is the second best solution as a fuel. In contrast wood has the last rank and cattle manure is the second last rank.

Table 8. P_i , R_i , Q_i and U_i values.

Material	P_i	R_i	Q_i	U_i	Rank
1	$0,\!108$	0,03	0,144	86,3	5
2	$0,\!116$	0,059	$0,\!134$	$80,\!593$	7
3	$0,\!12$	0,036	$0,\!15$	$90,\!14$	3
4	$0,\!109$	0,037	$0,\!138$	$83,\!041$	6
5	$0,\!119$	0,033	$0,\!152$	$91,\!492$	2
6	$0,\!104$	0,025	$0,\!148$	$88,\!805$	4
7	$0,\!116$	0,022	$0,\!167$	100	1

Table 9. Computation details for OCRA method.

Material	\bar{I}_i	$\bar{\bar{I}}_i$	\bar{O}_i	$\bar{\bar{O}}_i$	P_i	Rank
1	1,555	0,973	0,003	0	0,937	1
2	0,582	0	0,009	0,006	0,005	7
3	1,378	0,797	0,004	0,001	0,796	5
4	1,52	0,938	0,003	0	0,937	4
5	1,132	$0,\!55$	0,01	0	0,548	6
6	1,875	1,293	0,003	0	1,292	1
7	1,512	0,931	0,009	0,006	0,939	2

 Table 10. Weighted normalized decision matrix for ARAS method.

Material	(LHV)	(MC)	(D)	(AM)	(AD)	(VD)
1	0,082	0,012	0,008	0,019	0,01	0,004
2	0,077	0,004	0,002	0,018	0,023	0,004
3	0,081	0,009	0,003	0,019	0,015	0,004
4	0,082	0,012	0,009	0,013	0,01	0,004
5	0,091	0,013	0,001	0,015	0,004	0,005
6	0,11	0,05	0,006	0,013	0,004	0,004
7	0,09	0,025	0,001	0,019	0,007	0,02

Table 11. S_i , U_i and Rank values in ARAS method.

Material	S_i	U_i	Rank
1	$0,\!134$	0,715	3
2	0,128	$0,\!68$	7
3	0,131	$0,\!697$	4
4	0,129	$0,\!687$	5
5	0,128	$0,\!683$	6
6	0,188	1	1
7	0,161	0,857	2

4.5. TOPSIS

The decision matrix given in Table 1 was normalized using equation (31) for the application of the TOPSIS method and this was multiplied by the compromised weights obtained. In Table 12 is shown the weighted and normalized decision matrix V_{ij} for the alternatives for a biomass fuel. The ideal and nadir ideal solutions, determined by equations (32) and (33), are presented in Table 13. The distances from the ideal (S_i^+) and nadir ideal solutions (S_i^-) and the relative closeness to the ideal solution (C_i) are measured using equations (34)–(36). The biomass fuel alternatives could be ranked by the relative degree of approximation and the ranking is shown in Table 14. The ranking of the fuel alternatives are 7-1-5-4-3-6-2. For TOPSIS method wheat grain obtain the first rank for the biomass fuel. In contrast, wood has the last rank.

Table 12. Weighted and normalized decision matrix, V_{ij} of TOPSIS.

Material	(LHV)	(MC)	(D)	(AM)	(AD)	(VD)
1	0,398	0,288	0,065	0,315	0,232	0,428
2	0,419	0,769	0,309	0,348	0,097	0,425
3	0,403	0,384	$0,\!154$	0,315	0,148	0,444
4	0,398	0,288	0,058	0,469	0,232	0,428
5	0,357	0,269	0,531	0,395	0,633	0,332
6	0,294	0,067	0,097	$0,\!455$	0,589	0,373
7	0,363	$0,\!135$	0,763	0,313	0,337	0,083

 Table 13. The ideal and nadir ideal solutions of TOPSIS method.

	(LHV)	(MC)	(D)	(AM)	(AD)	(VD)
V^+	0,257	0,008	0,023	0,037	$0,\!045$	0,02
V^-	$0,\!18$	0,096	0,002	$0,\!055$	$0,\!007$	0,004

 Table 14. Computation details for TOPSIS method.

Material	S_i^+	S_i^-	C_i	Rank
1	0,047	0,091	$0,\!66$	2
2	0,097	$0,\!08$	$0,\!452$	7
3	$0,\!056$	0,086	$0,\!603$	5
4	$0,\!05$	0,089	$0,\!639$	4
5	0,047	$0,\!085$	$0,\!642$	3
6	0,081	$0,\!095$	$0,\!54$	6
7	0,044	$0,\!096$	$0,\!683$	1

4.6. SMART

The computational details, result and ranking of the SMART method are presented in in Table 15. The biomass fuel with the highest result was given the best rank. The ranking of alternatives by the SMART method was 6-7-5-1-2-3-4 which indicates that rice husk and wheat grain obtain the first and second ranks biomass fuel. On the other hand, whole cereal has the last rank and miscantus is the second last rank.

Table 15. Computation details for SMART method.

LHV	MC	D	$\mathbf{A}\mathbf{M}$	Α	V	Results	Ranking
0,151	0,094	0,033	0,165	0,102	0,17	0,119	4
0,159	0,035	0,156	0,149	0,043	0,169	0,119	5
0,153	0,071	0,078	0,165	0,065	0,177	0,118	6
0,151	0,094	0,029	0,111	0,102	0,17	0,11	7
0,136	0,101	0,269	0,131	0,279	0,132	0,175	3
0,112	0,403	0,049	0,114	0,26	0,148	0,181	1
$0,\!138$	0,202	0,386	0,166	$0,\!149$	0,033	0,179	2

4.7. Spearman's correlation coefficients

In Table 16 is shown the Spearman's correlation coefficients for biomass fuel. These represent the mutual correspondence among MCDM methods. The magnitude of this parameter for a PCM exceeds 0,554 for the relation of OCRA, ARAS, TOPSIS and SMART methods. Moreover, the correlation have a value of 0,839 between OCRA and TOPSIS methods.

Table 16. Spearman's correlation indexes

	OCRA	ARAS	TOPSIS	SMART
COPRAS	$0,\!357$	$0,\!357$	$0,\!554$	0,357
OCRA	-	0,714	0,839	$0,\!554$
ARAS	-	-	$0,\!554$	0,714
TOPSIS	-	-	-	0,357

5. Discussion

The MCDM are an important tool to recognize and identify the best alternative in a bunch of several of them. These methods can adapt to different sort biomass fuel that would affect the final result and that is why these approaches are applied in different areas of science, engineering and management.

In this case, we take advantage of MCDM in order know the best alternative for biomass fuel. In Fig. 1 is resumed the overall rank of each MCDM method for the different alternatives. It has been observed than COPRAS-G and TOPSIS methods the best biomass fuel alternative and the second best option for OCRA, ARAS and SMART is white grain because it has a good LHV and low moisture content. In case of OCRA, ARAS and SMART methods the best alternative correspond with rice husk. In addition, wood are presented on the last rank alternatives for four of the five MCDMs for its high moisture content. The method validation was correlated by Spearman's coefficients.



Figure 1. Rank materials vs. alternative materials for a biomass fuel.
6. Conclusions

In this paper the selection problem for a biomass fuel has been solved utilizing a decision model. The model includes the COPRAS-G, OCRA, ARAS, TOPSIS and SMART methods. Ranking scores which were used to rank the alternative biomass fuel were obtained as results of the methods. The weighting of the fuel properties was performed using the compromised weighting method w_j composes of the AHP and Entropy methods. According to the results of the best alternative COPRAS-G and TOPSIS methods and the second best option for OCRA, ARAS and SMART, white grain appear has the best choice for a biomass fuel.

It was validated that the MCDM approach is a viable tool in solving the complex decision problems. Spearman's rank correlation coefficient was found to be very useful in assessment of the correlation between three ranking methods. The model which was developed for the decision of a biomass fuel can be applied on other selection problems.

References

- R. Zamora-Cristales, J. Sessions, D. Smith, and G. Marrs, "Effect of grinder configuration on forest biomass bulk density, particle size distribution and fuel consumption," *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, pp. 44 – 54, 2015.
- [2] Z. Liu and G. Han, "Production of solid fuel biochar from waste biomass by low temperature pyrolysis," *Fuel*, vol. 158, pp. 159 – 165, 2015.
- [3] J. Jia, A. Abudula, L. Wei, B. Sun, and Y. Shi, "Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 400 – 410, 2015.
- [4] S. D. Stefanidis, E. Heracleous, D. T. Patiaka, K. G. Kalogiannis, C. M. Michailof, and A. A. Lappas, "Optimization of bio-oil yields by demineralization of low quality biomass," *Biomass* and *Bioenergy*, vol. 83, pp. 105 – 115, 2015.
- [5] Z. Zhi-hong, Y. Yi, and S. Jing-nan, "Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 18, no. 5, pp. 1020 – 1023, 2006.
- [6] P. C. Munasinghe and S. K. Khanal, "Biomassderived syngas fermentation into biofuels: Oppor-

tunities and challenges," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 13, pp. 5013 – 5022, 2010, special Issue on Lignocellulosic Bioethanol: Current Status and Perspectives.

- [7] R. Warnecke, "Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier," *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 6, pp. 489 – 497, 2000.
- [8] H. Kitzler, C. Pfeifer, and H. Hofbauer, "Pressurized gasification of woody biomass – variation of parameter," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 5, pp. 908 – 914, 2011.
- [9] S. Tuomi, N. Kaisalo, P. Simell, and E. Kurkela, "Effect of pressure on tar decomposition activity of different bed materials in biomass gasification conditions," *Fuel*, vol. 158, pp. 293 – 305, 2015.
- [10] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill International, 1980.
- [11] P. Chatterjee, V. M. Athawale, and S. Chakraborty, "Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods," *Materials & Design*, vol. 32, no. 2, pp. 851 – 860, 2011.
- [12] C. Parkan and M.-L. Wu, "Measurement of the performance of an investment bank using the operational competitiveness rating procedure," *Omega*, vol. 27, no. 2, pp. 201 – 217, 1999.
- [13] E. K. Zavadskas and Z. Turskis, "A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making," *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 16, no. 2, pp. 159– 172, 2010.
- [14] P. Chatterjee and S. Chakraborty, "Material selection using preferential ranking methods," *Materials & Design*, vol. 35, pp. 384–393, 2012.
- [15] P. Chatterjee, V. M. Athawale, and S. Chakraborty, "Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods," *Materials & Design*, vol. 32, no. 2, pp. 851–860, 2011.
- [16] M. A. Mustafa and T. C. Ryan, "Decision support for bid evaluation," *International Journal of Project Management*, vol. 8, no. 4, pp. 230 – 235, 1990.



Análisis comparativo de los modelos dinámicos de una turbina eólica de velocidad fija

Comparative analisys of dinamics models of a fixed speed wind turbine

Jesús Guamán-Molina^{1,*}, Carlos Vargas-Guevara¹, Katherin Rodríguez-Mora¹, Mario García-Carrillo² y Alberto Ríos-Villacorta¹

Resumen

En este artículo, se presenta un análisis comparativo del comportamiento dinámico de los modelos reducido y completo de una turbina eólica de velocidad fija. La herramienta informática utilizada en la realización de simulaciones es la plataforma SIMULINK/MATLAB. El principal objetivo de este estudio es demostrar la influencia del flujo del estator y del acoplamiento mecánico en la respuesta transitoria de las turbinas eólicas de velocidad fija. Asimismo, se ha analizado la influencia en el comportamiento dinámico de otros parámetros característicos de la turbina eólica, como la potencia reactiva aportada por la batería de condensadores y la inercia del generador y de las palas del rotor eólico.

Palabras clave: Modelos dinámicos, turbina, eólica, respuesta transitoria.

Abstract

In this article, a comparative analysis of the dynamic behavior of reduced and full of a wind turbine fixed speed models are presented. The tool used in performing simulations is the SIMULINK/MATLAB platform. The main objective of this study is to demonstrate the influence of the stator flux and the mechanical coupling of fixed speed wind turbine dynamic response. It has also analyzed the influence on the dynamic behavior of other characteristic parameters of the wind turbine, such as reactive power supplied by the capacitor bank and the inertia of the generator and wind rotor blades.

Keywords: Dynamic Models, Wind Turbine, Transient Response.

Recibido: 03-03-2016, aprobado tras revisión: 23-05-2016.

^{1,*}Unidad Operativa de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Autor para correspondencia ⊠: jguaman0585@uta.edu.ec ²Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Guamán, J.; Vargas, C.; Rodríguez, K.; García, M.; Ríos, A. (2016). «Análisis comparativo de los modelos dinámicos de una turbina eólica de velocidad fija». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 37-47. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

La integración de energía eólica en un sistema eléctrico exige estudios de integración entre los parques eólicos y el sistema eléctrico. El principal objetivo de los estudios de integración eólica es analizar el comportamiento del sistema eléctrico tanto en régimen permanente como en régimen dinámico. La operación del sistema eléctrico debe garantizar que el funcionamiento del sistema se realice de forma segura, económica y fiable. Por esta razón, es necesario evaluar la influencia de la conexión de un gran número de parques eólicos en la operación del sistema eléctrico, como por ejemplo en estudios de calidad de la energía, de estabilidad estática con ayuda de flujo de cargas, de estabilidad dinámica y transitoria. Evidentemente, el nivel máximo de penetración de energía eólica dependerá directamente de las características del sistema eléctrico analizado: del tipo, capacidad y distribución geográfica de los sistemas de generación convencionales, de los niveles de potencia de cortocircuito, de las capacidades de potencia reactiva, de la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas, etc. Un conjunto de procedimientos de operación garantiza la eficiencia y seguridad del funcionamiento de un sistema eléctrico y definen los requisitos técnicos a cumplir por los agentes del sistema eléctrico. En diversos países, con una significativa potencia eólica instalada, se ha introducido una serie de requisitos técnicos específicos a la conexión de parques eólicos, agrupados en procedimientos técnicos de conexión de parques eólicos [1], [2].

Los procedimientos técnicos de conexión establecen una serie de criterios de operación al control de potencia activa y reactiva, definen los perfiles de los huecos de tensión que han de soportar las instalaciones eólicas y proporcionan un conjunto índices de evaluación de la calidad de la energía eólica, como, por ejemplo, tasa de distorsión armónica o niveles de *flicker*.

En función de las características técnicas, de operación v fiabilidad del sistema eléctrico se especifican los requisitos mínimos que han de cumplir los parques eólicos frente a contingencias severas como los huecos de tensión. Los huecos de tensión son reducciones instantáneas de la tensión ante la ocurrencia de cortocircuitos trifásicos equilibrados o desequilibrados. Los parques eólicos deberán adoptar las medidas necesarias para no desconectarse frente a huecos de tensión. En España, el operador del sistema eléctrico – Red Eléctrica de España, REE – publicó el Procedimiento de Operación 12.3 [3], que establece una curva de tensión-tiempo, específicamente asociada a la magnitud y duración de las tensiones a soportar por una instalación eólica, ante cortocircuitos trifásicos, sin desconectarse de la red eléctrica, zona gris de la Figura 1.

El procedimiento de operación 12.3, además, establece los valores de potencia reactiva generada o consumida en función del nivel de profundidad del hueco de tensión, asociada a una curva de intensidad reactiva admisible-tensión en valores por unidad, en el nodo de conexión, Figura 2. Se considera, por tanto, que los parques eólicos deben generar potencia reactiva en el punto de conexión durante el período de hueco de tensión, zona gris de la Figura 2.

A un nivel de tensión superior a 0.85 pu en el punto de conexión, el parque puede generar o consumir potencia reactiva en función de las características del generador eléctrico empleado. En el presente artículo se simula y analiza la respuesta dinámica de diferentes modelos matemáticos de una turbina eólica equipada con generadores asíncronos de jaula de ardilla.

El principal objetivo del estudio consiste en demostrar la importancia de considerar el flujo magnético del estator y la flexibilidad del acoplamiento mecánico en el análisis transitorio de las turbinas de velocidad fija ante huecos de tensión simétricos.

Los parques eólicos de velocidad fija en régimen permanente consumen potencia reactiva. Así, una vez conocidos los límites de funcionamiento dinámico de los parques eólicos, en casos de huecos de tensión, los estudios de estabilidad transitoria a realizarse se comparan con las curvas de requisitos mínimos, establecidos por el operador del sistema eléctrico. Los resultados obtenidos del estudio comparativo han demostrado que el uso de un modelo matemático del generador de inducción de 5.° orden y un modelo de acoplamiento mecánico de dos masas incrementa el margen de estabilidad transitoria de las turbinas eólicas de velocidad fija.

Por tanto, se recomienda este modelo de turbina de velocidad fija para analizar el efecto de diferentes parámetros mecánicos y eléctricos en la respuesta transitoria de la turbina eólica de velocidad fija, así como en los típicos estudios dinámicos de integración de parques eólicos, formados por este tipo de turbinas eólicas.

2. Generador asíncrono de inducción

El uso de generadores asíncronos es atractivo debido a la robustez o bajo coste de estos convertidores electromecánicos. Las turbinas eólicas de velocidad fija están equipadas con generadores de inducción de jaula de ardilla, conectados directamente a la red eléctrica. El acoplamiento mecánico existente entre las palas del rotor de la turbina eólica y el generador eléctrico a través de una multiplicadora, puede representarse con ayuda de un modelo de dos masas o de una masa. En el caso del modelo de dos masas, el rotor eólico, que engloba a las palas, el buje y al eje de baja velocidad, y el eje de alta velocidad del generador eléctrico se representan como dos masas separadas, conectadas entre sí por un acoplamiento flexible. La caja multiplicadora establece un acoplamiento flexible entre los dos ejes de la turbina que giran a diferentes velocidades.



Figura 1. Curva de tensión-tiempo admisible en el punto de conexión [3].



Figura 2. Curva de intensidad reactiva admisible – tensión [3].

En el modelo de una masa, el rotor eólico, la multiplicadora y el eje de alta velocidad del generador eléctrico se representan por una única masa puntual, despreciando la elasticidad existente entre el eje de alta y el eje de baja velocidad. Además, debido al rígido acoplamiento entre el sistema mecánico y el sistema eléctrico de la turbina, las fluctuaciones del par mecánico de la turbina eólica son transmitidas desde el eje de baja velocidad al eje de alta velocidad del generador eléctrico y consecuentemente, aparecen como fluctuaciones de la potencia eléctrica generada.

La potencia reactiva absorbida por el generador de inducción depende de la carga de la turbina y se incrementa con el aumento de la potencia eléctrica generada, proporcional a la velocidad del viento. El factor de potencia de los generadores de inducción es de alrededor de 0.85 - 0.90 inductivo. Este factor de potencia exige la instalación de baterías de condensadores que compensen el consumo de potencia reactiva. El generador de inducción posee una característica de par-deslizamiento estrechamente relacionada con la tensión en bornes de la máquina y que afecta al comportamiento dinámico de la turbina de velocidad fija. Durante una contingencia severa, un hueco de tensión profundo provoca un incremento del deslizamiento del generador de inducción. La intensidad del estator y, por tanto, el consumo de potencia reactiva también se incrementan. Adicionalmente, las baterías

de condensadores generan menos potencia reactiva, puesto que dependen del cuadrado de la tensión, por lo que el efecto del hueco de tensión se ve intensificado. Si el hueco de tensión decrece hasta el punto que el par amortiguador del generador de inducción es inferior al par mecánico proporcionado por el viento, el rotor del generador se acelerará, desconectando la turbina. Para evitar la aparición de un colapso de tensión es necesario instalar sistemas dinámicos de compensación de potencia reactiva como los SVC o STATCOM [4], [5], [6].

Diferentes estudios evalúan el comportamiento dinámico de las turbinas eólicas de velocidad fija en términos del tiempo crítico de despeje de falta, [7], [8], [9], [10], definido como el máximo tiempo de duración de una falta sin que la turbina se desconecte. La influencia de diversos parámetros eléctricos y mecánicos sobre el tiempo crítico de despeje de falta no consideran los transitorios en el flujo del estator.

En otros trabajos, la respuesta de estabilidad dinámica es evaluada en términos de la recuperación de la tensión, sin embargo, el modelo matemático del acoplamiento mecánico es representado con avuda del modelo de una masa, ignorando la flexibilidad aportada por la multiplicadora al acoplamiento mecánico entre las palas del rotor eólico y el eje del generador eléctrico [4], [11], [12]. Estas excesivas simplificaciones pueden conducir a resultados y conclusiones erróneas. Puesto que los operadores de sistemas eléctricos han establecido requisitos de incremento de la capacidad para soportar huecos de tensión en las instalaciones eólicas, en función de un tiempo máximo de duración del hueco, parece más lógico analizar el comportamiento dinámico de los generadores de inducción en términos de tensión y velocidad de giro del generador eléctrico en lugar del tiempo crítico de despeje de falta.

3. Esquema de análisis comparativo

En la Figura, se muestra el diagrama representativo del esquema eléctrico utilizado en el estudio comparativo y una representación esquemática de los cuatro modelos matemáticos propuestos para la turbina eólica, empleados en el estudio comparativo dinámico frente a huecos de tensión. Se han incluido dos modelos matemáticos del generador de inducción de jaula de ardilla: el modelo completo y el reducido. El primero es el también conocido como modelo de 5.° orden que incluye los transitorios del flujo del estator. Por el contrario, el modelo reducido o de 3.^{er} orden es aquel en el que el comportamiento dinámico del estator se desprecia. El acoplamiento mecánico entre las palas y el generador eléctrico ha sido representado por sus dos modelos matemáticos más utilizados en la literatura especializada: el modelo flexible o de dos masas y el modelo inflexible o de una sola masa.



Figura 3. Esquema eléctrico utilizado en el análisis comparativo de los diferentes modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos del acoplamiento mecánico y del generador de inducción de la turbina eólica de velocidad fija han sido implementados en el programa SIMULINK/MATLAB.

Se ha incluido, además, el sistema de compensación de potencia reactiva, basado en baterías de condensadores, el transformador elevador de baja a media tensión y la impedancia del equivalente Thevenin hasta el punto de conexión a la red eléctrica.

La turbina eólica está compuesta por un generador de inducción de jaula de ardilla de una potencia nominal de 2 MW y tensión nominal de 690 V. El generador asíncrono es conectado a la red de media tensión de 20 kV a través de un transformador elevador de 2.7 MVA y una relación de transformación de 0.69/20 kV.

Los parámetros mecánicos de la turbina eólica, y eléctricos del generador asíncrono son dados en la Tabla 1 y 2 respectivamente.

En la Figura 4, se muestra la implementación práctica del estudio comparativo de los diferentes modelos matemáticos de una turbina eólica de velocidad fija en la plataforma de simulación MATLAB/SIMULINK.

4. Criterios de análisis comparativo

Para investigar el efecto de los transitorios en el estator y del modelo de acoplamiento mecánico en el comportamiento dinámico de una turbina eólica de velocidad fija se ha realizado un estudio comparativo de los diferentes modelos matemáticos, descritos en el apartado anterior.

En este estudio, se usa la respuesta de tensión después de una falta simétrica trifásica como un criterio de estabilidad dinámica. Asimismo, se determina el tiempo crítico de despeje de falta como criterio complementario de estabilidad dinámica.

Además, se analiza la respuesta de intensidad en el estator, la velocidad de giro del generador y del rotor eólico, la potencia activa y reactiva del generador eléctrico.

En todos los casos analizados, el tiempo de duración de la falta es de 500 ms y la caída de tensión alcanza el 20 % de la tensión nominal en el punto de conexión, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento de operación 12.3. Generalmente, el tiempo típico de despeje de una falta trifásica está en el orden de los 100 – 200 ms. Cuando se investigan oscilaciones

Parámetros de la turbina eólica	Unidad de medida
Velocidad de arranque, v_{cut-in}	4 m/s
Velocidad nominal del viento, v_{nom}	15 m/s
Velocidad de giro nominal (turbina eólica), $\omega_{\mathbf{r}_{nom}}$	17 rpm
Velocidad de giro nominal (generador), $\omega_{\mathbf{g}_{nom}}$	1510,5 rpm
Ángulo de calado, β	0°
Diámetro del rotor, D_{pala}	$76 \mathrm{m}$
Longitud de la pala, L_{pala}	$37 \mathrm{m}$
Área barrida, A	4500 m^2
Inercia de la turbina eólica, J_r	$5,35 \times 10^6 \text{ kg m}^2$
Constante de inercia de la turbina eólica, H_r	3,75 seg
Rigidez del acoplamiento mecánico, K_{tg}	74,65 pu
Amortiguamiento del acoplamiento mecánico, D_{tg}	5,0 pu
Relación de la multiplicadora, n_{gear}	93,75

Tabla 1. Parámetros de la turbina eólica.

Tabla 2. Parámetros del generador inducción.

Parámetros del generador de inducción	Unidad de medida
Potencia nominal, P_{nom}	$2 \mathrm{MW}$
Potencia nominal de la batería de condensadores, Q_{nom}	918,2 kVar
Tensión nominal, U_{nom}	690 V
Frecuencia nominal, f_{nom}	50 Hz
Deslizamiento nominal, s_{nom}	0,7~%
Inercia del generador eléctrico, J_g	$121,5 \text{ kg m}^2$
Constante de inercia del generador eléctrico, H_q	$0,75 \mathrm{seg}$
Resistencia del rotor,	0,0015 Ω
Resistencia del estator,	0,0015 Ω
Reactancia del rotor,	$0,005 \ \Omega$
Reactancia del estator,	0,00714 Ω
Reactancia magnetizante,	1,04742 Ω



Figura 4. Implementación práctica del análisis comparativo de los modelos matemáticos de una turbina de velocidad fija.

electromecánicas, el rango de tiempo de interés para estudios dinámicos oscila entre 1 y 10 s.

5. Análisis de los resultados

5.1. Comparación del modelo de generador eléctrico completo y reducido

En este caso se compara el comportamiento dinámico de un modelo de generador completo frente a un modelo reducido. Ambos modelos utilizan un modelo de acoplamiento flexible. Después de un segundo, se aplica un cortocircuito trifásico en el punto de conexión con la red eléctrica, Figura 5.

La primera falta trifásica se ha despejado después de 500 ms, en tanto que una segunda falta se ha despejado después de 790 ms.

La falta despejada a los 790 ms está relacionada con el tiempo crítico de despeje de falta del modelo reducido del generador eléctrico.

En la Figura 5, se muestra la respuesta de tensión en bornes del generador eléctrico, la velocidad de giro de la turbina eólica y del generador eléctrico, la intensidad en el estator, la potencia activa y reactiva de la turbina eólica. En la Figura 5, cuando se aplica un cortocircuito trifásico en el punto de conexión con la red eléctrica, aparece un hueco de tensión cerca de los terminales del generador de inducción de la turbina eólica. La Figura 5a, muestra como el comportamiento electromecánico del generador se ve afectado.

Las fluctuaciones que aparecen en la tensión, en la intensidad del estator, en la velocidad del rotor del generador eléctrico, en el par electromagnético y en otros parámetros mecánicos y eléctricos se deben a la interacción electromecánica entre la red eléctrica y el acoplamiento mecánico de la turbina eólica. La magnitud y duración de estas oscilaciones depende de las características de torsión del acoplamiento mecánico. Además, el comportamiento dinámico de un generador de inducción se caracteriza por la estrecha relación existente entre los parámetros eléctricos y la velocidad del rotor del generador.

Inicialmente, se describe el impacto de un cortocircuito en el comportamiento eléctrico de un generador de inducción. Si se aplica un cortocircuito muy cerca de los terminales del generador, el flujo del estator decrece instantáneamente. El flujo del rotor, sin embargo, no decrece de forma instantánea debido a la elevada capacidad conductora de la estructura magnética de la jaula de ardilla del rotor, que se opone a cualquier cambio del flujo magnético en cualquier instante de tiempo. Por tanto, en los primeros instantes después de la falta, el generador de inducción inyecta potencia reactiva a la falta contribuyendo a la intensidad de la corriente de falta de cortocircuito con su corriente de desmagnetización, este fenómeno se muestra en la zona ampliada de la Figura 5d. La potencia reactiva aportada por el generador de inducción desmagnetiza el rotor, por lo que el flujo del rotor y la corriente del estator desaparecen sobre los 200 ms, Figura 5f. Cuando se comparan los modelos matemáticos del generador de inducción se observan importantes discrepancias en el comportamiento dinámico de la intensidad de corriente en el estator. El modelo reducido presenta una respuesta de la corriente que no incluve los transitorios de frecuencia fundamental. La magnitud de la corriente prevista por el modelo reducido es, por tanto, menor que el que se obtiene con el modelo completo del generador, esta característica se muestra en la zona ampliada de la Figura 5d. El valor de la magnitud de la corriente del estator es un parámetro muy importante para el diseño de los sistemas de protección de la turbina eólica.

Si se desprecian los transitorios de frecuencia fundamental en el estator, entre los modelos simulados del generador de inducción aparece otra notable discrepancia en los resultados obtenidos para el par de frenado. Evidentemente, esto induce a errores en la respuesta de la velocidad de giro del rotor. Si se utiliza un modelo reducido, la velocidad del rotor se incrementa inmediatamente después de la aparición del cortocircuito, mientras que en un modelo completo, la velocidad del rotor del generador decrece ligeramente en un primer instante y luego se acelera, este fenómeno se aprecia en la zona ampliada de la Figura 5c.

Por otro lado, la velocidad de giro del rotor del generador eléctrico exhibe oscilaciones mecánicas transmitidas por las oscilaciones de par eléctrico del generador, ver la zona ampliada de la Figura 5c. Estas oscilaciones de frecuencia fundamental se deben al flujo estacionario inducido en el entrehierro, durante la desmagnetización del rotor.

Estos transitorios desaparecen en función de la constante de tiempo del estator y son rápidamente amortiguados. La propagación de los transitorios de par desde el eje de alta velocidad al eje de baja velocidad, a través de la multiplicadora, son completamente filtradas por la elasticidad torsional del eje de baja antes de alcanzar el rotor de la turbina, tal como se muestra en la respuesta de la velocidad del rotor de la turbina en la Figura 5b.

Inmediatamente después del cortocircuito, la potencia activa generada se reduce debido a que la tensión del estator alcanza un valor cercano a cero, Figura 5e. La pérdida de potencia eléctrica, inyectada por el generador, causa un desequilibrio entre el par electromagnético de frenado y el par mecánico acelerador (inicialmente invariable), ejercido por el eje de la turbina eólica en función de la velocidad del viento. Por este motivo, el rotor del generador se acelera durante el cortocircuito.

El rotor del generador se acelera por dos razones: una razón es que el rotor acumula energía giratoria



Figura 5. Respuesta transitoria de una turbina eólica de velocidad fija con un modelo flexible de 5.° y 3.^{er} orden ante un cortocircuito trifásico.

durante la falta, puesto que el viento mantiene una potencia mecánica sobre el eje, aunque no se pueda exportar potencia eléctrica durante la falta. La segunda razón es que el eje de transmisión actúa como un resorte mecánico que se extiende durante la falta. Durante la falta, el par electromagnético se reduce a un valor cercano a cero, lo que extiende el resorte. Debido al diseño aerodinámico de las palas de la turbina eólica no es posible reducir el par mecánico durante el cortocircuito, por lo que el rotor de la turbina eólica también se acelera. Esto da como resultado que el rotor del generador sufra una aceleración adicional.

Cuando se despeja la falta, la tensión recupera su valor inicial, en tanto que el generador asíncrono se ha desmagnetizado y el rotor se ha acelerado, aumentando el deslizamiento negativo de la máquina. En el momento de despeje de la falta, el rotor del generador eléctrico se ha acelerado hasta un valor superior a un determinado valor nominal. Esto implica que el valor de la potencia reactiva demandada por el generador sea significativo. La potencia reactiva consumida por el generador de inducción explica la lenta recuperación de la tensión en bornes de la máquina. Durante la magnetización del rotor, el estator consume un gran valor de intensidad reactiva. Dependiendo de la rigidez de la red eléctrica, esta corriente magnetizante causa una caída de tensión, que reduce la tensión en los terminales del generador por debajo de su valor nominal. Si la duración del cortocircuito es demasiado larga y/o la magnetización del generador de inducción es demasiado lenta, el aumento de la velocidad del rotor será considerable.

El generador eléctrico se puede recuperar satisfactoriamente después de un cortocircuito solo si consigue magnetizarse lo suficientemente rápido para producir un par de frenado, que permita reducir el exceso de velocidad experimentado por el rotor durante la falta. Si el exceso de velocidad es tan grande que el par de frenado no es suficiente para reducir la aceleración del rotor del generador, el consumo de potencia reactiva seguirá siendo apreciable. Precisamente, una técnica para elevar el margen de estabilidad de los generadores asíncronos es reducir el par aerodinámico durante todo el tiempo de duración de cortocircuito. Asimismo, debido a las propiedades elásticas del acoplamiento mecánico, después del despeje de la falta, el tren de transmisión es excitado por oscilaciones torsionales, por lo que la velocidad de giro oscila. Estas oscilaciones son transmitidas a la potencia activa y reactiva del generador eléctrico, Figuras 5e y 5f.

En la Figura 5a, cuando se aplica un cortocircuito de 500 ms, el tiempo de recuperación de la tensión es el mismo para los dos modelos matemáticos comparados del generador asíncrono. Inmediatamente después del cortocircuito, la tensión se reduce hasta un 0.13 pu y se recupera después de aproximadamente 3 s. Por otro lado, la duración de las oscilaciones torsionales es de algunos segundos, que corresponde a una frecuencia natural de oscilación del acoplamiento mecánico igual a 1 - 2 Hz.

Asimismo, en la zona ampliada de la misma figura se muestra el efecto de tomar en cuenta la dinámica del flujo del estator. Estos transitorios son trasladados a la respuesta de tensión durante la falta. Por esta razón, aparecen oscilaciones de frecuencia fundamental inmediatamente después de la aparición del hueco de tensión, inmediatamente después de la aparición de la falta, y durante el proceso de recuperación de tensión. Además, como ya se ha mencionado anteriormente, el comportamiento de la potencia reactiva influye considerablemente en la recuperación de tensión cuando se despeja la falta.

Cuando el rotor del generador se acelera excesivamente, el consumo de potencia reactiva es tan elevado que afecta a la recuperación de la tensión. Este comportamiento de la tensión es observado en la Figura 5a cuando se despeja el cortocircuito a 790 ms, que corresponde al tiempo crítico de despeje de falta del modelo reducido. Por tanto, el modelo reducido presenta una forma de recuperación de la tensión más pesimista que el modelo completo. De la Figura 5c, se observa también, para ambos modelos analizados, violentas oscilaciones de la velocidad del rotor del generador durante el período posterior a la falta.

5.2. Comparación del modelo de acoplamiento mecánico flexible e inflexible

En el segundo caso analizado, se compara el comportamiento dinámico del modelo flexible frente al modelo inflexible del acoplamiento mecánico de una turbina eólica. En este caso analizado, se usa el modelo matemático completo del generador asíncrono. Al igual que en el apartado anterior, se ha aplicado un cortocircuito trifásico en el punto de conexión con la red eléctrica con dos diferentes tiempos de despeje.

La primera falta trifásica se ha despejado después de 500 ms, tal como se establece en el procedimiento de operación 12.3 [3], en tanto que una segunda falta se ha despejado después de 645 ms. La falta despejada a los 645 ms está relacionada con el tiempo crítico de despeje de falta del modelo inflexible del acoplamiento mecánico.

Los principales parámetros mecánicos y eléctricos del comportamiento dinámico de ambos modelos de la turbina eólica frente a un cortocircuito trifásico se muestran en la Figura 6.

De las Figuras 6a y 6b se observa que la tensión en los terminales del generador y la velocidad de giro del rotor del generador eléctrico para el modelo inflexible recuperan su magnitud anterior a la falta mucho más rápido que en el modelo de dos masas. Se observa también en la Figura 6b que la velocidad del rotor del



(e) Potencia reactiva

Figura 6. Respuesta transitoria de una turbina eólica con un modelo asíncrono de 5.° orden rígido y flexible frente a un cortocircuito trifásico.

generador para el modelo flexible está sujeto a relativamente elevadas oscilaciones mientras que el del modelo inflexible recupera su valor en régimen permanente sin ninguna oscilación.

Los resultados de las simulaciones relacionadas con la respuesta de tensión y la velocidad del rotor del generador para una duración de la falta de 645 ms son presentados en las Figuras 6a y Figura 6b.

Como se muestra en la Figura 6a, en el modelo flexible, la tensión en los terminales del generador asíncrono ha alcanzado su valor anterior a la falta, mientras que en el modelo inflexible se observa un colapso de tensión.

Asimismo, se observan violentas oscilaciones durante el período posterior al despeje de la falta. En la Figura 6b se muestra que, en el modelo flexible, la velocidad del rotor del generador recupera de forma gradual su valor anterior a la falta. Por el contrario, la velocidad de giro del rotor del generador relacionada con el modelo inflexible continúa aumentando y alcanza violentas oscilaciones, este comportamiento indica que el generador se hace inestable. Estas oscilaciones se trasladan a los parámetros eléctricos del generador de inducción como la potencia eléctrica, la potencia reactiva y la intensidad del estator como se muestra en las Figuras 6c, 6d y 6e, respectivamente.

Analizando los resultados obtenidos es posible deducir que el valor del tiempo crítico de despeje de falta para un modelo inflexible es mayor que el de un modelo flexible. Por otro lado, las curvas obtenidas con el uso de un modelo flexible difieren significativamente de las obtenidas usando un modelo inflexible.

En el caso del modelo inflexible no se observan importantes fluctuaciones ni en la velocidad de giro del rotor ni en el perfil de tensión. En el modelo inflexible, las oscilaciones del eje de acoplamiento mecánico son vistas como una ondulación de muy pequeña magnitud en la respuesta de tensión, en consecuencia, este comportamiento no influye en la estabilidad dinámica de tensión. En otras palabras, cuando se utiliza un modelo flexible, las oscilaciones del sistema de acoplamiento mecánico causan fluctuaciones en la velocidad del rotor del generador, que se ven reflejados en los parámetros eléctricos de la turbina eólica. Las fluctuaciones de tensión v su más lenta recuperación después de una falta en la red son resultado del efecto de los transitorios mecánicos del sistema de transmisión de las turbinas eólicas, equipadas con generadores de inducción.

6. Conclusiones

Diversos operadores europeos de sistemas eléctricos exigen que las turbinas eólicas, y por tanto, los parques eólicos puedan soportar huecos de tensión. En este sentido, es necesario realizar estudios dinámicos que permitan evaluar la influencia de diferentes parámetros eléctricos y mecánicos en la respuesta transitoria de las turbinas eólicas. Los resultados obtenidos del estudio comparativo recomiendan el empleo de un modelo de 5.° orden y un modelo flexible de acoplamiento mecánico de la turbina de velocidad fija en la respuesta transitoria en los estudios de integración de parques eólicos en la red eléctrica convencional.

Referencias

- Specifications for Connecting Wind Farms to the Transmission Network, Transmission System Planning Std. ELT1999-411a, 2000.
- [2] German Operator E-On. (2001, December) Erganzendenetzanschlussregelnfurwindenergi eanlagen.
- [3] Red Eléctrica de España. (2004) Procedimiento de operación 12.3: Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones de producción de régimen especial. REE. España. [Online]. Available: www.ree.es
- [4] A. Ríos, "Continuidad de suministro de parques eólicos ante huecos de tensión," Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2007.
- [5] A. Ríos and M. Gascó, "Transient stability of variable speed wind farms during grid fault," Wind Engineering, vol. 37, no. 2, pp. 199–212, 2013.
- [6] A. Ríos and D. Guevara, "Influence of the dvr on the transient response of wind farms against voltage sags," *Wind Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 335–347, 2015.
- [7] P. Ledesma, "Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica," Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2001.
- [8] S. K. Salman and A. L. J. Teo, "Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 793–802, May 2003.
- [9] K. U. T. Senjyu, N. Sueyoshi and T. Funabashi, "Stability analysis of grid connected wind power generating system," in *Third International Work*shop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Stockholm, 2002, 2002.
- [10] J. G. Slootweg, "Wind power: Modeling and impact on power system dynamics," Ph.D. dissertation, Technical University of Delft, December 2003.

- [11] V. Akhmatov, "Analysis of dynamic behaviour of electric power system with large amount of wind power," Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, Denmark, April 2003.
- [12] L. Holdsworth, X. G. Wu, J. B. Ekanayake,

and N. Jenkins, "Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 3, pp. 343–352, May 2003.



Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo

Performance analysis of developing water systems through the coupling hydrologic stochastic models and network flow optimization

Alex Avilés-Añazco^{1,*}, Abel Solera-Solera², Javier Paredes-Arquiola³

Resumen

El presente estudio muestra una metodología para el análisis del rendimiento de sistemas de recursos hídricos, mediante un acople de modelos estocásticos y de optimización, con el objetivo de tener una herramienta de ayuda para la planificación y gestión de la oferta y demanda de agua en cuencas hidrográficas en pleno desarrollo. Los métodos empleados exponen la fortaleza de los modelos hidrológicos estadísticos para captar patrones de comportamiento histórico de las series de caudales y sintetizar esta información mediante la generación de series probables de caudales futuros y, además, la capacidad de ligar estas series a modelos para la simulación de la gestión de sistemas de recursos mediante la optimización de redes de flujo conservativa cuyo objetivo es minimizar los déficits de suministros a las demandas de agua.

Abstract

This study presents a methodology for analyzing the performance of water resources systems through a coupling stochastic models and models of optimization, with the aim of having a support tool for planning and management of supply and demand for water in basins in full development. Methods exposed the strength of statistical hydrological models to capture historical behavior patterns of streamflow time series and synthesize this information by generating likely future streamflow time series, and also the ability to link these series to the simulation models of water resources system management by optimizing conservative flow networks whose objective is to minimize deficits to supply water demands.

²Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia – España.

³Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia – España.

Recibido: 29-04-2016, aprobado tras revisión: 31-05-2016

^{1,*}Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia ⊠: alex.aviles@ucuenca.edu.ec

Forma sugerida de citación: Avilés, A.; Solera, A. y Paredes, J. (2016). «Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 48-57. ISSN: 1390-650X.

La aplicación de esta metodología se realizó en la cuenca del río Tomebamba en Ecuador, analizando el potencial suministro hídrico del sistema, donde se pudo demostrar la utilidad del método para manejar información probabilística para la planificación de infraestructuras de regulación en una cuenca y para gestionar sistemas de recursos hídricos con déficit de agua y con un enfoque de riesgo de insatisfacción de las demandas.

Palabras clave: Sistemas hídricos, modelos estocásticos, simulación, optimización, gestión del riesgo. The application of this methodology was performed in Tomebamba river basin in Ecuador, analyzing the potential water supply system, which could demonstrate the usefulness of the method to handle probabilistic information for the reservoir planning in a watershed and water resources systems management with water deficit and with an approach of risk of dissatisfaction of the demands.

49

Keywords: Water systems, Stochastic Models, Simulation, Optimization, Risk Management.

1. Introducción

En los últimos tiempos ha sido un desafío para los tomadores de decisiones la asignación de los recursos hídricos [1]. El incremento de la población y la disminución de la disponibilidad de agua han agravado las competiciones entre los diferentes usos del agua, llevando a complejas situaciones donde no son fáciles las decisiones, particularmente bajo diversas condiciones naturales y deterioro de la calidad del líquido vital [2].

En consecuencia, la demanda creciente de agua en términos de cantidad suficiente y calidad adecuada, ha obligado a los planificadores a contemplar y proponer planes cada vez más ambiciosos para sistemas de recursos hídricos [3], [4]. La comprensión de la dinámica de estos sistemas y la compleja interacción de los factores y variables que gobiernan su comportamiento, exige el desarrollo de teorías, técnicas, modelos y algoritmos, mediante los cuales se pueda tener una aproximación a su realidad física [5].

En este sentido, los modelos de simulación y optimización han sido ampliamente usados en la gestión y planificación de sistemas de recursos hídricos y sistemas de embalses.

Los modelos de simulación son útiles para contestar la pregunta: ¿qué pasa si...?, evaluando el desempeño del sistema con diferentes alternativas operacionales. Mientras tanto los modelos de optimización son mejores cuando se trata de encontrar soluciones óptimas con determinados objetivos y limitaciones, no obstante, son matemáticamente más complejos que los modelos de simulación y requieren más recursos computacionales [6].

Muchos modelos son construidos para casos particulares en cuencas específicas, sin embargo, existen otros modelos más generales que integran herramientas matemáticas, sistemas de información y bases de datos para ayudar al gestor de un sistema en el proceso de toma de decisiones. Estos son los denominados sistemas de soporte de decisiones (SSD).

En [6] describe algunas herramientas computacionales para la simulación de sistemas, como el programa HEC 5 [7] actualizado a HEC RESSIM [8], también modelos de simulación dinámica como STELLA [9] y POWERSIM (Powersim, Inc.) aplicado por [10]; además, realiza una evaluación del estado del arte en modelos de optimización en sistemas de embalses, donde describe métodos de optimización no lineales y estocásticos, así como también métodos heurísticos de programación mediante algoritmos evolutivos y genéticos, junto con la aplicación de sistemas basados en reglas difusas para inferir las políticas del sistema operativo de los embalses.

Existen otros programas como el SSD AQUATOOL [11] que abarcan modelos de simulación y optimización de sistemas de recursos hídricos, cuyos resultados son un soporte para la toma de decisiones de los gestores de cuencas. Otros ejemplos de programas que incorporan modelos de optimización en un SSD son MODSIM [12] y CALSIM [13].

También existen estudios que muestran un enfoque combinatorio de modelos, mediante la exploración y comparación de algoritmos de optimización para inferir reglas de operación de embalses o analizar sistemas de recursos hídricos [14], [15].

La adopción o construcción de una u otra metodología va a depender de la particularidad del problema, de la información disponible y de la capacidad computacional que se disponga, por esto en el presente trabajo se ha optado por metodologías para la simulación de la gestión de sistemas de recursos hídricos mediante la optimización de redes flujos conservativas acoplada a modelos estocásticos hidrológicos para analizar el rendimiento de sistemas que requieren una planificación a corto y mediano plazo.

Los modelos estocásticos han sido utilizados durante mucho tiempo para evaluar el rendimiento de sistemas de recursos hídricos, determinar capacidad de embalses, analizar la efectividad de reglas de gestión, planificar la implementación de infraestructura de regulación, generar escenarios para simular el comportamiento futuro de sistemas y otras aplicaciones más.

Estos modelos nacen por la marcada variabilidad temporal y espacial de muchos procesos y componentes en un sistema que dan cuenta que son funciones de muchos factores estocásticos, es por esto por lo que los análisis de los sistemas van más allá de los métodos convencionales deterministas [2]. En [16] señala que un rango significativo de escenarios futuros habrá sido explorado, si se generan muchas series de caudales sintéticos, cada una con una cierta probabilidad de ocurrencia.

La generación de escenarios futuros mediante series sintéticas se basa en modelos matemáticos que son capaces de reproducir las estadísticas de las series históricas, Estos modelos han sido muy estudiados por muchos autores, no solo para la generación sintética hidrológica, sino también para la predicción hidrológica.

Con estos antecedentes, el presente trabajo pretende mostrar una metodología para analizar el rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo. La aplicación de esta metodología se realizó en la cuenca del río Tomebamba en Ecuador, analizando el potencial suministro hídrico del sistema.

2. Metodología

2.1. Modelación estocástica

Los modelos estocásticos se fundamentan principalmente en el máximo aprovechamiento de la información de la serie histórica de un conjunto de variables, es decir, reproducir las estadísticas de las series de datos históricos medidos. El concepto clave en este tipo de modelos es la correlación temporal entre las series de datos. La estructura general del modelo se muestra a continuación [17]:

$$Yt = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-n}, Xt, X_{t-1}, \dots$$
(1)
$$X_{t-m}, \theta) + \epsilon t$$

Donde Y_{t-i} vector formado por las variables de salida del sistema en el instante t-i, i=0,..n; X_{t-j} : vector formado por las variables de entrada del sistema en el instante t-j, j=0,..m; θ : vector de parámetros del modelo y ϵ t: vector de residuos o errores del modelo en el instante t. El proceso de modelado se puede resumir en los tres pasos siguientes [18]: 1. Identificación de la composición, forma y el tipo de modelo. 2. Ajuste del modelo (estimación de parámetros). 3. Diagnóstico del modelo (comprobación de la bondad de ajuste del modelo).

En general la mayoría de técnicas estadísticas y la teoría de probabilidades aplicados en hidrología son desarrolladas asumiendo variables normalmente distribuidas, porque la mayoría de curvas de frecuencia de variables hidrológicas son asimétricamente distribuidas [18], es esta la razón por lo que se debe transformar estas variables a una distribución normal antes de iniciar la modelación, esto se consigue probando múltiples funciones normalizadoras como por ejemplo la función logaritmo $[Y_t = Ln(X_t + a)]$, la función potencia $[Y_t = (X_t + a)^b]$, entre otras más.

Por otro lado, se asume que la serie a modelar debe ser estacionaria, es decir, que sus estadísticos son constantes en el tiempo al menos en media y varianza [17], es por esto por lo que se debe realizar la estacionarización (estandarización en media y varianza) de la serie de tiempo si la serie no es estacionaria, para lograr esto se puede utilizar la siguiente fórmula cuando la serie es mensual:

$$Z_t = Y_t - \frac{\mu}{\sigma} \tag{2}$$

En donde, μ : es el estimador de la media de la serie transformada Y_t y σ : es el estimador de la desviación típica de la serie transformada Y_t , esto se realiza para cada mes del año, es decir, se tendrá 12 estimadores de la media y 12 estimadores de la desviación típica. Con ello se tendrá una serie mensual Z_t normalizada y estandarizada de media cero y desviación típica la unidad.

Cuando se modela a escala semanal y diaria, es necesario el ajuste de series de Fourier para determinar los estimadores de la media y la desviación típica. Las series Z_t son las entradas para probar múltiples modelos estocásticos como los autoregresivos de media

móvil [ARMA (p,q)] [19], los autoregresivos de media móvil periódicos [PARMA (p,q)] [18] y otros según las características y particularidad de cada serie.

Hay que hacer notar que una vez que se ha realizado el ajuste del modelo, se deberá deshacer las operaciones efectuadas a la serie original, mediante las operaciones inversas.

A pesar de que los modelos ARMA reproducen de una manera aceptable las propiedades estadísticas históricas de series de datos, algunos autores recomiendan realizar una modelización con parámetros periódicos cuando la serie histórica es mensual [18] y los estadísticos básicos (media, desviación típica y autocorrelación) presentan significantes variaciones estacionales.

Además de probar algunos modelos, también se ensayan diferentes órdenes (p, q) para cada modelo, con el objeto de ir determinando los parámetros en cada caso (ajuste del modelo) y la comprobación de la bondad de ajuste, de tal forma para conseguir un conjunto de modelos que sean capaces de reproducir las propiedades estadísticas históricas de los datos (estadísticos básicos, sequía y almacenamiento) y esencialmente las suposiciones claves de los residuos como la normalidad y la independencia.

Finalmente, se escoge los mejores modelos para la generación de series sintéticas anuales y mensuales, mediante el criterio de información de Akaike corregido AICC [20], basado en una penalización de los modelos con mayor número de parámetros.

Los mejores modelos ajustados y validados son utilizados para generar series sintéticas, lo esencial de esta creación es conservar las propiedades estadísticas de la muestra histórica, como resultado cada muestra generada es igualmente probable que ocurra en el futuro [21].

Por esta razón estos modelos se consideran adecuados cuando los estadísticos (básicos, sequía y almacenamiento) de la serie histórica y generada son similares. Los valores de los estadísticos de la serie generada se calculan mediante un promedio de los valores correspondientes de todas las series generadas.

La finalidad de la generación de series sintéticas anuales es analizar la posibilidad de implementar infraestructura para la regulación del agua y la finalidad de la generación de series sintéticas mensuales es construir escenarios futuros para la gestión de la infraestructura planificada, el conjunto de estas series son las entradas para la simulación de sistemas de recursos hídricos.

Los estadísticos básicos que se toman en cuenta en este estudio son la media, la desviación estándar, la varianza, el sesgo, el valor mínimo y el valor máximo. Y los estadísticos de sequía que se toman en cuenta son la más larga duración de sequía y la magnitud máxima de sequía, para el cálculo de estos estadísticos se debe considerar un umbral, es decir, un valor por debajo de ese umbral origina un déficit, siendo la sequía la sucesión de déficits, por lo regular el valor de este umbral está relacionado con un nivel de demanda total de agua en el sistema.

Los estadísticos de almacenamiento que se toman en cuenta son la capacidad de almacenamiento (también dependiente de un nivel de demanda), el rango reajustado y el coeficiente de Hurst [22].

2.2. Simulación de sistemas de recursos hídricos

Como en este estudio se tratan sistemas de recursos hídricos en plena evolución, es decir, todavía tienen deficiencias en planificación y gestión, inexistencia de infraestructura adecuada, así como también carencia de reglas de gestión que maximicen la satisfacción de las demandas, se deben realizar diferentes ensayos (simulaciones con múltiples escenarios) con diferentes situaciones presentes y futuras para solventar necesidades en los sistemas, o sea, planificar un rendimiento efectivo del mismo en la actualidad y en el futuro.

Para cumplir este objetivo se ha recurrido a la simulación de la gestión a escala mensual con múltiples escenarios, mediante la construcción de esquemas de los sistemas que se traducen en redes de flujo conservativas que se optimizan cada mes (con programación lineal mediante el algoritmo OUT-OF-KILTER [23], [24] para cumplir la función objetivo de maximizar la satisfacción de las demandas, cumpliendo las restricciones de conservación de masa (continuidad) y los límites físicos de transporte de flujo en conducciones (ríos, quebradas, etc.) y capacidades de embalses.

Con este antecedente se muestra la siguiente metodología que se describe a continuación y se resume en la Figura 1.

Primero se realiza un chequeo del cumplimiento de la satisfacción de las demandas en el presente y en el futuro mediante la simulación del sistema con las aportaciones mensuales históricas llevadas a un régimen natural (suponiendo que no existirá ninguna alteración del régimen natural en el futuro), las demandas actuales y la estimación de las demandas futuras.

En caso de incumplimiento de las demandas, se deberá planificar la implementación de una infraestructura de regulación con una capacidad óptima mediante la utilización de las series sintéticas anuales, Este paso es con la finalidad de cumplir con la totalidad del recurso requerido por las demandas y es comprobado mediante la simulación del sistema en condiciones futuras, es decir, con las aportaciones mensuales históricas llevadas a un régimen natural (suponiendo que estas se presentaran en el futuro, por ausencia de cambios en el régimen hidrológico) y las demandas futuras.

En caso de que no se pueda implementar infraestructuras de regulación de gran envergadura por cuestiones físicas, ambientales, sociales o económicas, se plantearán infraestructuras de regulación con menor capacidad, sin embargo, se corre el riesgo de incumplir con la satisfacción total de las demandas en algunos meses del período total de simulación, dando inicio a la simulación múltiple (con escenarios estocásticos) para la gestión de sistemas de recursos hídricos con riesgo de desabastecimiento de agua, las entradas para este paso son las series sintéticas mensuales y las demandas futuras estimadas, es decir, se simulará un determinado número de escenarios futuros dependiendo de cuántas series sintéticas mensuales son generadas.

Una vez realizada la simulación mensual múltiple con escenarios estocásticos se analiza los resultados determinando el grado de incumplimiento de las demandas y se planifica medidas de gestión para minimizar la insatisfacción de las mismas. Finalmente, se deberán evaluar las medidas planificadas en la fase de explotación del sistema.

El cálculo de la capacidad óptima del embalse se debe realizar mediante un análisis probabilístico de las múltiples capacidades de almacenamiento derivadas de las series sintéticas anuales y la demanda total futura estimada.

La validación de este valor se realiza simulando el sistema incluyendo el embalse planificado con capacidad ideal y con las aportaciones históricas llevadas al régimen natural, suponiendo que estas sucederán en el futuro, es decir, en esta metodología no se toma en cuenta el cambio climático y/o cambio de uso de tierra que puedan afectar el régimen hidrológico futuro.

Las redes flujo son una representación del sistema, la misma que está formada por nudos (embalses, tomas, derivaciones, etc.) unidos por arcos (quebradas, ríos, canales, etc.) por las cuales circula un flujo (caudales) X_{ij} dirigido del nudo *i* a al nudo *j*. El costo por unidad de flujo circulando por el arco X_{ij} es C_{ij} y cada arco X_{ij} tiene una capacidad máxima de flujo $U_{ij} \ge 0$ y un flujo mínimo $L_{ij} \ge 0$, el problema de optimización de la red puede plantearse de la siguiente manera [24]:

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^{m} \sum_{i=1}^{m} C_{ij} X_{ij}$$
(3)

Sujeto a:

Ì

$$\sum_{j=1}^{m} X_{ij} - \sum_{k=1}^{m} X_{ki} = p_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$X_{ij} \ge L_{ij} \qquad i, j = 1, \dots, m \qquad (5)$$

$$X_{ij} \le U_{ij} \qquad i, j = 1, \dots, m \qquad (6)$$

$$U_{ij} \ge L_{ij} \ge 0 \quad i, j = 1, \dots, m \tag{7}$$



Figura 1. Servidor web basado en Arduino [3].

Donde la restricción de la ecuación (4) establece que la suma de los flujos salientes del nudo i menos la suma de los flujos entrantes al mismo, es la producción pi, del nudo i. Si la producción es positiva el nudo es una fuente, mientras que si la producción es negativa es un sumidero.

Cuando todos los π , $i = 1, \ldots, m$ son nulos, entonces se tiene una red de flujo conservativa, la cual es empleada en este estudio. Este problema de optimización es resuelto aplicando el algoritmo para redes de flujo conservativas OUT-OF-KILTER, basado en los problemas de programación lineal primal y dual [23].

Según [24], este problema de optimización se puede asemejar a sistemas de recursos hídricos, donde la formulación se transforma a una función objetivo mostrada en (8), que minimiza la suma ponderada de los déficits de suministros a zonas de demandas (d_i, t) , también minimiza los déficits de caudales ecológicos $(d'_{i,t})$, y maximiza el volumen almacenado en los embalses $(V_{i,N\cdot 12})$ al final de cada periodo de optimización elegido (Número de años N por 12 meses).

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^{N\cdot 12} \left[\sum_{i=1}^{n} \alpha i \cdot d_{i,t} + \sum_{i=1}^{nc} \beta i \cdot d'_{i,t} \right] - \sum_{i=1}^{ne} \delta i \cdot V_{i,N\cdot 12}$$
(8)

Donde $\ll n \gg$ es el número de demandas (consuntivas y no consuntivas), $\ll nc \gg$ es el número de conducciones (ríos, quebradas y canales que pueden fijarse caudales ecológicos), $\ll ne \gg$ es el número de embalses y los factores de ponderación son αi , βi y δi , que dependen de las prioridades asignadas a cada demanda, a cada caudal ecológico, a cada embalse y la prioridad entre elementos, es decir, la prioridad entre todas las demandas, todos los caudales ecológicos y todos los embalses.

53

El resultado de la resolución del problema de optimización es la asignación óptima de recursos a todos los elementos a nivel mensual.

2.3. Acople de los modelos hidrológicos estocásticos y los modelos de simulación

Los resultados de los modelos hidrológicos estocásticos lanzan un conjunto grande de series que conservan las propiedades estadísticas de la muestra histórica. Cada una de estas series generan los potenciales escenarios futuros que son considerados en los modelos de simulación.

Finalmente, los múltiples resultados de los modelos de simulación brindan la información necesaria de una manera probabilística para analizar la situación del sistema de recursos hídricos en estudio y permiten al gestor de la cuenca, planificar medidas de gestión de oferta y demanda de agua que maximicen el rendimiento del sistema.

3. Caso de aplicación.

La aplicación de esta metodología se realizó en la subcuenca del río Tomebamba, perteneciente a la cuenca del río Paute en el Ecuador (Figura 2), es una cuenca de alta montaña ubicada entre 2500 y 4000 m s. n. m., la zona alta se encuentra en el Parque Nacional Cajas (considerado patrimonio natural del Ecuador), está compuesta por páramos, bosques montanos, humedales y ecosistemas característicos de los Andes tropicales. de enero, febrero, marzo, mayo, junio, septiembre y noviembre, el modelo PARMA (1,1) para los meses de abril, julio, agosto y diciembre y el modelo PARMA (1,2) para el mes de octubre.

Con el modelo ARMA (1,1) se generaron 100 series sintéticas de 31 años cada una, mientras que con los mejores modelos PARMA se generaron 100 series sintéticas de 372 meses cada una. No fue necesario generar un número elevado de series sintéticas dado que el sistema es sencillo y con un solo punto de generación [25].

Se construyó un diseño del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba para la simulación de la gestión del mismo (Figura 3), agrupando diferentes tipos de demandas, especialmente teniendo en cuenta las demandas con mayor cantidad de agua requerida, por ejemplo: el agua para consumo humano de la ciudad de Cuenca. Además, se tomó en cuenta caudales ecológicos para los diferentes cursos de agua.



Figura 3. Esquema del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.

Finalmente, se priorizó la repartición del agua, poniendo en primer lugar el agua para consumo doméstico, luego el agua para riego y finalmente los otros usos.

Una vez diseñado el esquema del sistema se procedió con la aplicación de la metodología de la Figura 1. Se simuló la gestión del sistema en el escenario actual (1979-2009) y el escenario futuro (2010-2040), no cumpliendo la satisfacción total de las demandas, es por esto por lo que se planificó la implementación una infraestructura de regulación con una capacidad ideal (21 hm³), de tal forma de cumplir con todo el volumen de agua que requerían las demandas.

Sin embargo, tomando en cuenta la fragilidad ambiental de la zona alta y las ordenanzas de conservación por ser un patrimonio natural, sería poco factible un embalse de gran capacidad, por lo que se planificó un embalse con la mitad de capacidad del embalse óptimo (10 hm^3) , iniciando una gestión del sistema con riesgo de desabastecimiento de agua a las demandas.

El siguiente paso fue simular el sistema en estas condiciones y con 100 escenarios futuros (derivados de las series sintéticas mensuales), determinando el grado de incumplimiento de las demandas a nivel de



Figura 2. Ubicación de la subcuenca del río Tomebamba.

La cuenca no posee infraestructuras de regulación, además tiene una gran importancia por ser la que abastece de agua a la ciudad de Cuenca (en la zona baja de la subcuenca), también abastece de agua a demandas de riego ubicadas en la zona media de la subcuenca y en mucho menor proporción a otros usos como abrevaderos de ganado y piscícolas.

La cuenca no posee infraestructuras de regulación, además, tiene una gran importancia por ser la que abastece de agua aproximadamente al 34 % de la población de la ciudad de Cuenca (200 000 habitantes en la zona baja de la subcuenca), también abastece a las demandas de riego ubicadas en la zona media de la subcuenca y en mucho menor proporción a otros usos como abrevaderos de ganado y piscícolas.

La información utilizada para la aplicación de la metodología pertenece al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (serie mensual de caudales históricos) y la Secretaría Nacional del Agua del Ecuador (concesiones actuales de agua para la utilización del recurso hídrico en las distintas demandas).

La serie mensuales histórica de caudales (X_t) fue obtenida de la estación Matadero en Sayausí, cuya ubicación se encuentra aguas abajo de la zona alta de la subcuenca considerada como natural y sin una significativa intervención de la población. Esta serie tiene 31 años de datos históricos (1979-2009) y fue normalizada mediante una transformación a través de la función raíz cuadrada $(Y_t = X_t^{1/2})$ y estandarizada (Z_t) a nivel mensual mediante la sustracción del estimador de la media de la serie transformada (Y_t) y la división por el estimador de la desviación típica de la serie transformada (Y_t) .

Para el proceso de modelación a escala anual se probaron varios modelos ARMA con diferentes órdenes: (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,3) y (3,3), en donde el mejor modelo según AICC fue el ARMA (1,1). A escala mensual se probaron 11 modelos PARMA [(1,0); (1,1); (1,2); (1,3); (1,4); (2,1); (2,2); (3,2); (3,3); (4,3); (4,4)], en donde los mejores modelos escogidos según el AICC fueron el modelo PARMA (1,0) para los meses probabilidades y finalmente generar medidas restrictivas en la gestión de las demandas que minimicen este incumplimiento. Para facilitar la aplicación de la metodología y para la obtención de resultados se utilizó los siguientes programas: SAMS [21], SIMGES [26] y SIMRISK [27].

Hay que tener presente que la planificación del embalse solo se realizó para su capacidad y no de la ubicación del mismo.

4. Resultados

Para validar los modelos estocásticos, los estadísticos de las series sintéticas anuales generadas fueron comparados con los estadísticos de la serie histórica anual, resultando una buena conservación de las propiedades estadísticas.

Por otro lado, a escala mensual, se realizó el mismo procedimiento, los estadísticos de las dos series fueron comparados, los mismos que se presentan en la Tabla 1, en este podemos observar que existe variaciones no importantes en todos los estadísticos básicos excepto en los valores mínimos de la serie, sin embargo, dado que esperaríamos menores valores de aportaciones en algunas series generadas (escenarios futuros), los análisis de cumplimiento de satisfacción de las demandas se los realizaría en las condiciones más desfavorables y por lo tanto del lado de la seguridad.

Tabla 1. Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Mensual y la Serie Sintética Mensual Generada de la estación Matadero en Sayausí.

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Variación
Media	16.22	16.08	0.87~%
Desviación estándar	9.32	9.29	0.28~%
Varianza	86.82	86.59	0.26~%
Sesgo	0.84	0.86	-1.97 %
Min	0.89	0.35	60.16~%
Max	50.65	52.54	-3.74 %

Con respecto a los estadísticos de sequía y almacenamiento, existen variaciones múltiples con distintos niveles de demanda, sin embargo, estos estadísticos de la serie histórica y generada son similares, por ejemplo, la máxima duración de déficit tiene una variación aproximada desde un 6 %, la máxima magnitud de déficit tiene una variación aproximada desde un 12 % y la capacidad de almacenamiento tiene una variación aproximada desde un 14 %.

Solo el rango reajustado tiene una variación considerable de 39 %, no obstante, el coeficiente de Hurst tiene una variación baja de 14 %.

Tomando en consideración las variaciones insignificantes de los estadísticos básicos y la baja variación de algunos estadísticos de sequía y almacenamiento, podemos decir que las series sintéticas generadas mensuales son equiprobables que la serie histórica mensual.

55

Los resultados de los cálculos de capacidad de almacenamiento muestran que existieron 40 valores que fueron nulos (es decir, no se necesitaría infraestructura de regulación) y 60 valores no nulos, los mismos que fueron ajustados a una función de probabilidad (Figura 4).



Figura 4. Función de probabilidad para los valores de capacidad de almacenamiento.

Con este ajuste se pudo derivar la probabilidad de no excedencia de la capacidad de embalse planificada, así para la capacidad óptima de 21 hm³ tiene una probabilidad de no excedencia del 70 % y para la capacidad factible de 10 hm³ tiene una probabilidad de no excedencia del 55 %.

Los resultados de la simulación de la gestión mensual múltiple muestran que la probabilidad máxima promedio mensual de estado del embalse de 10 hm³ en los tres niveles inferiores (0-1, 1-2 y 2-3 hm³) bordea el 20 % y esta probabilidad máxima recae en el mes de febrero (Figura 5), además casi un 15 % de probabilidad incurre en el nivel 0-1 hm³, puede ser que este valor sea aceptable para los gestores del sistema, sin embargo, si se desea se puede bajar estos valores a un valor límite inferior de probabilidad de estado en los niveles inferiores, restringiendo el suministro de agua a las demandas, sobre todo a las demandas menos prioritarias.

Pero todo esto va a depender de los gestores del sistema y del valor del riesgo que quieran imponerse para el sistema.

Las probabilidades de fallos (situación de insatisfacción en el suministro) de las demandas están divididas en 4 niveles (0-25 % ; 25-50 % ; 50-75 % ; 75-100 %), los mismos que representan la cantidad de suministro de agua en esa demanda, es decir el nivel 50-75 %, representa un máximo suministro de agua del 75 % del valor total de la demanda, o sea un 25 % de déficit máximo de agua.

Revisando algunos resultados tenemos que los valores máximos de probabilidad de fallo promedio mensual en los 4 niveles de la demanda de la ciudad de Cuenca y las demandas de riego suceden en el mes de febrero con un valor de aproximadamente 6 % y 8 % respectivamente (Figuras 6 y 7), incluso hay un valor de probabilidad de fallo promedio mensual de casi 7 % en el nivel más crítico (75 % de déficit en el suministro) de las demandas de riego.



Figura 5. Probabilidad promedio mensual de estado del embalse de 10 hm³ de los niveles 0-1, 1-2 y 2-3 hm³.

De igual manera, podría interesar para la gestión futura del sistema bajar el valor de estimación de probabilidad de fallo en las demandas (sobre todo de las prioritarias), previendo medidas y reglas en la gestión de la demanda futura, incluso sacrificando la satisfacción total de las demandas menos prioritarias. No obstante, esto dependerá del nivel de riesgo que deseen imponerse los gestores del sistema para la insatisfacción en las demandas y el sistema en su conjunto.



Figura 6. Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda de la ciudad de Cuenca.

5. Conclusiones

La metodología que se ha propuesto constituye una herramienta de soporte para los gestores del agua a nivel de cuencas hidrográficas que necesitan una planificación para las condiciones futuras de tal manera de optimizar el rendimiento de sistemas de recursos hídricos que están en plena evolución.

La incorporación de componentes probabilísticos para generar alternativas en la oferta y demanda del agua en sistemas de recursos hídricos favorece a una visión más integral de los problemas y necesidades que se puedan presentar en el futuro y ayuda a los tomadores de decisiones para la identificación de reglas adecuadas en la gestión y planificación del agua en cuencas hidrográficas.



Figura 7. Probabilidad promedio mensual de fallo de las demandas de riego Sayausí y San Joaquín.

En la aplicación del caso de estudio se han extraído algunas enseñanzas, por ejemplo, la utilidad de la metodología para planificar infraestructuras de regulación y poder simular situaciones en condiciones óptimas y factibles, dependiendo de las características físicas, económicas, sociales y ambientales en una cuenca hidrográfica.

Por otro lado, la aplicación de esta metodología muestra una herramienta eficaz en la gestión de sistemas con escasez de recurso hídrico, proponiendo medidas para disminuir el riesgo de desabastecimiento de agua a demandas prioritarias.

Finalmente, indicar que se pueden desarrollar algunos trabajos futuros explorando a profundidad algunas suposiciones que se hicieron en el presente estudio, como la incorporación de la variación del régimen hidrológico por cambios en el uso de la tierra o cambios climáticos y la estimación de las demandas futuras con métodos más robustos.

Referencias

- Y. P. Li, G. H. Huang, G. Q. Wang, and Y. F. Huang, "Fswm: A hybrid fuzzy-stochastic watermanagement model for agricultural sustainability under uncertainty," *Agric. Water Manag*, vol. 96, no. 12, pp. 1807–1818, December 2009.
- [2] Y. Huang, Y. P. Li, X. Chen, A. M. Bao, and M. Zhou, "Simulation-based optimization method

for water resources management in tarim river basin, china," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 2, pp. 1451–1460, January 2010.

- [3] Y. Li and G. Huang, "Inexact multistage stochastic quadratic programming method for planning water resources systems under uncertainty," *Environ. Eng. Sci*, vol. 24, no. 10, pp. 1361–1378, 2007.
- [4] D. P. Loucks, J. R. Stedinger, and D. A. Haith, Water Resource Systems Planning and Analysis, Prentice-Hall, Ed., 1981.
- [5] J. Ochoa, "Modelo estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión probabilística de sequías (doctoral dissertation, tesis doctoral dirigida por: D. joaquín andreu álvarez y. d. rafael garcía bartual)," Ph.D. dissertation, Presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [6] J. W. Labadie and M. Asce, "Optimal operation of multireservoir systems?: State-of-the-art review," *J. Water Resour. Plan. Manag*, vol. 130, no. 2, pp. 93–111, 2004.
- [7] V. R. Bonner, "Hec-5: Simulation of microcomputers). model-simulation," 1989.
- [8] J. Klipsch, "Hec-ressim: Capabilities and plans," Second Federal Interagency Modeling Conf, Las Vegas, Nevada, 2002.
- [9] S. Stein, C. Miller, S. Stout, and J. Webb, "Big sandy river basin stella reservoir regulation model," *Proc.*, World Water and Environmental Congress. ASCE, Orlando, Fla, 2001.
- [10] K. Varvel and K. Lansey, "Simulating surface water flow on the upper rio grande using powersim 2001," SAHRA-NSF Science and Technology Center for Sustainability of Semi-Arid Hydrology and Riparian Areas, 2002.
- [11] J. Andreu, J. Capilla, and E. Sanchís, "Aquatool, a generalized decision-support system for waterresources planning and operational management," *J. Hydrol*, vol. 177, no. 3-4, pp. 269–291, 1996.
- [12] J. Labadie, M. Baldo, and R. Larson, "Modsim: decision support system for river basin management: Documentation and user manual." 2000.
- [13] A. Munevar and F. Chung, "Modeling california's water resource systems with calsim (asce)," In Proceedings of 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference. ASCE Conf. Proc, p. 95, 1999.
- [14] J. Paredes, A. Solera, and J. Andreu, "Reglas de operación para sistemas multiembalse, combinando métodos heurísticos y redes de flujo,"

Tecnol. y Ciencias del Agua, vol. 23, no. 3, pp. 151–164, January 2008.

57

- [15] E. S. Camacho and J. Andreu, "Optimización de la expansión de un sistema de recursos hídricos utilizando las metodologías del algoritmo genético y el recocido simulado," *Ing. hidráulica en México*, vol. 16, no. 2, pp. 17–26, 2001.
- [16] S. J. Burges, "Simulation of water resource system. proceedings of the national workshop on reservoir systems operations." University of Colorado, Boulder, Colorado, August 13-17 1979, pp. 136–165. [Online]. Available: https://cdn. sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/ MQ-4%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf.
- [17] T. Estrela, "Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos," CEDEX, 1992.
- [18] J. D. Salas, "Applied modeling of hydrologic time series," *Water Resources Publication*, 1980.
- [19] J. Box and G. Jenkins, "Reinsel. time series analysis, forecasting and control." Tercera. NJ: Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1994.
- [20] C. M. Hurvich and C.-L. Tsai, "Regression and time series model selection in small samples," *Biometrika*, vol. 76, no. 2, pp. 297–307, June 1989.
- [21] O. Sveinsson, J. D. Salas, W. Lane, and D. Frevert, "Stochastic analysis, modeling, and simulation (sams) version 2007, user's manual," 2007.
- [22] H. Hurst, "Long-term storage capacity of reservoirs," *Trans. Amer. Soc. Civ. Eng*, vol. 116, pp. 770–808, 1951.
- [23] D. Cattrysse, "Linear programming and network flows m.s. bazaraa, j.j. jarvis and h.d. sherali wiley, new york, 1990, xiv+684 pages, £15.95, second edition (first edition, 1977), isbn 0-471-63681-9, cloth available at £43.20," *International Journal* of Hydrogen Energy, vol. 50, no. 1, 1991.
- [24] J. Andreu, "Conceptos y métodos para la planificación hidrológica." Barcelona, España, 1993.
- [25] S. Sánchez, J. Andreu, and A. Solera, "Gestión de recursos hídricos con decisiones basadas en estimación del riesgo," Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- [26] J. Andreu, A. Solera, J. Capilla, and J. Ferrer, "Modelo simges para simulación de cuencas. manual de usuario v3. 00," Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [27] J. Andreu, A. Solera, J. Capilla, and S. Sánchez, "Modelo simrisk de simulaciónn múltiple de la gestión de recursos hídricos: Manual de usuario v 2.4," Editorial UPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 2004.



Inversor multinivel acoplado sin transformador a la línea eléctrica para la incorporación de fuentes fotovoltaicas distribuidas

GRID CONNECTED INVERTER WITHOUT TRANSFORMER FOR THE INCLUSION OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC SOURCES

Julio César Viola^{1,*}, José Restrepo-Zambrano², José Manuel Aller-Castro² y Flavio Quizhpi-Palomeque¹

Resumen

El presente trabajo trata sobre el estudio, diseño e implementación de un inversor multinivel capaz de operar con los esquemas de distribución eléctricos más comunes en el Ecuador y que pueda ser acoplado a la línea sin necesidad de transformador. Su control incluye la posibilidad de revertir los flujos de potencia en caso de ser necesaria la carga de bancos de batería. El trabajo presenta los pasos seguidos en el diseño así como las simulaciones de funcionamiento y resultados experimentales preliminares.

Palabras clave: Inversor multinivel, control de flujo de potencia, paneles fotovoltaicos, generación distribuida.

Abstract

This paper addresses the study, design and implementation of a multilevel inverter aimed to operate with the Ecuador's most commonly used electrical distribution schemes, being able to be connected to the grid without a transformer. The implemented control allows to revert the power flow if it is required (e.g. charge a battery bank). The paper shows the different steps for the design, as well as simulations and preliminary experimental results.

Keywords: Multilevel inverter, power flow control, photovoltaic arrays, distributed generation.

^{1,*}Grupo de Investigación en Energías. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador.

Recibido: 15-04-2016, aprobado tras revisión: 31-05-2016.

Forma sugerida de citación: Viola, J.; Restrepo, J.; Aller, J. M.; Quizhpi, F. (2016). «Inversor multinivel acoplado sin transformador a la línea eléctrica para la incorporación de fuentes fotovoltaicas distribuidas». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 58-65. ISSN: 1390-650X.

Autor para correspondencia ⊠: jcviola@ieee.org

²Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela.

1. Introducción

El crecimiento vertiginoso de las instalaciones fotovoltaicas domiciliarias durante los últimos años ha sobrepasado incluso a los pronósticos más optimistas. La magnitud de esta expansión se debe fundamentalmente a las políticas de subsidio y reducción de impuestos adoptadas por muchos países donde destacan fundamentalmente: Alemania, China, Italia, España y Estados Unidos (principalmente en el Estado de California). Este fenómeno genera un círculo virtuoso que ha logrado hacer bajar el precio de cada vatio generado por medio de un panel fotovoltaico desde \$ 77 en 1977 a menos de \$ 0.36 en 2015 [1]. La capacidad mundial total instalada alcanza los 177 GW y se estima que en 2015 se incorporen más de 40 GW adicionales [2] de los cuales se estima que un 20 %será de instalaciones residenciales [1].

La incorporación de este gran número de generadores distribuidos trae consigo problemas de estabilidad dada la impredictibilidad asociada a la generación solar. Para tratar con este problema IEEE redactó en el año 2003 el estándar IEEE1547 titulado «Standard para interconectar recursos distribuidos con los sistemas eléctricos de potencia» [3], [4]. Este estándar sigue siendo actualizado hasta el día de hoy y dentro de sus distintas secciones incluye:

- guías para el diseño y conexión al sistema eléctrico de los inversores y paneles,
- guías para monitoreo, intercambio de información y control de los equipos involucrados, y
- guías para el diseño, operación e integración de sistemas aislados de generación distribuida.

En el Ecuador, la matriz energética está dominada por la generación hidráulica siendo aún bajo el impacto de las instalaciones solares fotovoltaicas, especialmente en lo que se refiere a instalaciones residenciales. La geografía del país y el recurso solar disponible hacen, sin embargo, muy interesante el estudio del impacto que tendría la masificación de instalaciones residenciales basadas en paneles solares. Si se consideran por ejemplo nuevas tendencias de la sociedad como el uso de cocinas de inducción, las cuales imponen un pico de demanda al sistema eléctrico en horas de la mañana, una instalación fotovoltaica domiciliaria de relativo bajo costo podría ayudar a aplanar ese pico. Igualmente el potencial uso masivo de automóviles eléctricos tendría un excelente complemento en el aprovechamiento del recurso solar que cada usuario residencial podría hacer con paneles instalados en el techo de su domicilio.

En el Grupo de Investigación en Energías de la Universidad Politécnica Salesiana se vienen desarrollando en los últimos años numerosos proyectos de investigación en el área de las energías renovables algunos de los cuales han incluido el desarrollo de equipos electrónicos únicos en el país [5], [6]. En esa misma línea de investigación se consideró el realizar un diseño propio para un inversor domiciliario adaptado a la realidad del país en cuanto a costos y normativa eléctrica. En el presente trabajo se describe el estudio, diseño y prueba de un inversor multinivel capaz de ser acoplado a la línea eléctrica sin necesidad de transformador y que permite incorporar de manera segura y estable la generación solar fotovoltaica disponible en instalaciones residenciales. El modo de operación del equipo puede ser fácilmente llevado de monofásico 120 V a bifásico en topología contrafase el cual constituye el modo más común de suministrar 220 V domiciliarios en el Ecuador.

La estructura general del artículo es la siguiente: en la sección 2 se describen las instalaciones domiciliarias basadas en paneles fotovoltaicos y sus modos típicos de funcionamiento. En la sección 3 se describen la topología multinivel utilizada, los filtros de acoplamiento a la línea, la capacidad de operación monofásica y bifásica y el diseño de disipadores y gabinete metálico. Finalmente, las secciones 4 y 5 muestran la simulación integral del sistema y algunos resultados experimentales, respectivamente.

2. Instalaciones residenciales fotovoltaicas

La estructura típica para una instalación de generación basada en paneles fotovoltaicos se muestra en la Figura 1, donde se pueden observar los paneles fotovoltaicos típicamente instalados sobre el techo de la construcción, el inversor y, opcionalmente, un banco de baterías. El requerimiento o no de poseer banco de baterías depende de las necesidades particulares del usuario, pero también de las legislaciones vigentes en cada país. En algunos casos como los de Japón o Alemania los usuarios están moviéndose al modo de autoconsumo el cual requiere la instalación de baterías las cuales aportan, además, estabilidad al sistema eléctrico [7].



Figura 1. Instalación residencial fotovoltaica típica.

La conexión de las cargas del usuario se realiza en el punto de acoplamiento común (PCC por sus siglas en inglés) entre el inversor y la red justo «aguas abajo» del medidor de consumo de energía. De esta manera, cuando hay potencia disponible en los paneles fotovoltaicos, el inversor se encargará de extraer toda la potencia disponible en los paneles ante cualquier condición de radiación solar. Para esto el control del inversor se programa con un algoritmo de rastreo del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés). Esta forma de conexión genera tres escenarios posibles según las potencias de generación disponibles y la demanda establecida por las cargas conectadas:

- La potencia disponible a la salida de los paneles fotovoltaicos (P_{DC}) y en consecuencia a la salida del inversor (P_{inv}) es menor a la demandada por las cargas domiciliarias conectadas. En este caso el inversor ayuda a aliviar el consumo de energía proveniente de la red eléctrica pública que el usuario tendría.
- La potencia P_{DC} disponible supera a la requerida por las cargas conectadas en cuyo caso el inversor puede inyectar el excedente hacia la línea pública. Debe observarse que este escenario podría no ser permitido por la legislación en materia eléctrica vigente en algunos países o en algunos casos no estar siquiera normado.
- Un último escenario es el de un corte absoluto del suministro eléctrico en cuyo caso el inversor puede operar en modo isla, esto es desconectándose de la línea eléctrica y alimentando por su cuenta a las cargas domiciliarias.

La Figura 2 resume los tres escenarios descritos, los cuales se toman como guía para el diseño del inversor propuesto en este trabajo ya que se desea que el equipo pueda operar en cada uno ellos. El caso del Escenario 2 es uno de los más interesantes porque permite al usuario «vender» la energía sobrante al sistema eléctrico público en horas de altas radiaciones y «comprar» posteriormente en horas de la noche. Este modo de operación permite que el costo del sistema fotovoltaico se amortice en menos tiempo, ya que no se hace necesario el uso de bancos de baterías para aprovechar los excedentes de generación que existen en ciertos momentos del día.

En el caso del Escenario 3 la norma IEEE1547 requiere que el inversor se desconecte galvánicamente de la línea eléctrica pública para poder seguir alimentando las cargas residenciales. Esto requiere de un algoritmo de detección de modo isla («anti-islanding» en inglés) de manera de asegurar que ante una caída del servicio eléctrico público las líneas no permanezcan energizadas por el inversor lo cual constituye un riesgo para los operarios que potencialmente estén manipulándolas [8].





Figura 2. Escenarios resultantes según la potencia generada en los paneles y las cargas conectadas.

3. Estructura del inversor y su acoplamiento a la red

Estos dos apartados suelen aparecer juntos en muchos trabajos. No debemos confundir esta discusión o análisis con la obtención de conclusiones, algo que depende tanto de los resultados y de su análisis como del marco teórico y de los objetivos.

3.1. Topología del inversor multinivel

El inversor seleccionado es uno de tres niveles de tensión con acoplamiento de punto de neutro (NPC por sus siglas en inglés) cuyo esquema circuital se muestra en la Figura 3. Esta topología fue propuesta en 1981 [9] y es hoy en día la más ampliamente utilizada entre las topologías multinivel. Si bien solo agrega un nivel más de tensión respecto a la clásica estructura de dos niveles posee características que lo hacen muy adecuado para aplicaciones solares tales como el hecho de poder aterrar fácilmente el punto de neutro (N) lo cual es un requerimiento de seguridad dado por la norma IEEE1547. En este diseño se utilizarán transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT por sus siglas en inglés) en configuración NPC0. El modelo elegido por su buena relación costo beneficio es el Vincotech 10-FZ07NMA100SM-M265F58 [10], el cual tiene una tensión de bloqueo de 650 V y maneja corrientes de 100 A. En la sección 3.4 se describe la forma en que estos módulos son fijados a los respectivos disipadores los cuales le permitirán operar a su máxima capacidad de disipación de potencia.



Figura 3. Estructura de inversor 3 niveles con acoplamiento de punto neutro (NPC).

3.2. Filtros LCL

El acoplamiento del inversor a la línea eléctrica debe realizarse mediante un elemento que realice un efecto de filtrado o separación entre la tensión sinusoidal presente en la línea y la tensión conmutada entregada por el inversor. Este filtro se encargará de eliminar la mayor parte de los armónicos de corriente de alta frecuencia correspondientes a la frecuencia de conmutación del convertidor dejando pasar los componentes a frecuencia de línea. Los dos esquemas más utilizados son el filtro inductivo que está compuesto de un simple inductor colocado entre el inversor y la tensión de línea y la red LCL la cual se compone de dos inductores y un condensador. Ambos esquemas se muestran en la Figura 4, donde v_{INV} representa el nodo de tensión del inversor y v_L es el nodo de tensión de red.



Figura 4. (a) Filtro inductivo, (b) filtro LCL.

Para el caso del filtro inductivo simple se requiere de valores de inductancia del orden de las decenas de

mH para poder obtener un filtrado aceptable. Esto implica bobinados relativamente voluminosos, pesados y más caros que los requeridos por el esquema LCL. En este esquema se pueden obtener excelentes resultados con valores para L1 en el orden de las centenas de $\mu H y$ para L2 en el orden de las decenas de μ H, en tanto que para el condensador C se requieren valores del orden de las decenas de μ F. El volumen, peso y costo de la estructura LCL resulta menor y los efectos de filtrado son mejores dado que la respuesta en frecuencia presenta una pendiente de caída de -60 dB/dec tal como se observa en la Figura 5. Para el caso del filtro puramente inductivo se tienen solamente -20 dB/dec. La estructura LCL tiene como desventaja la presencia de un pico de resonancia en $\omega_0 = \sqrt{(L1 + L2)/(L1 L2 C)},$ pero con un adecuado diseño de los componentes puede evitarse que este pico afecte a ninguno de los armónicos involucrados [11]. En el caso del presente diseño la frecuencia de conmutación es de 16 kHz por lo que se diseña para una frecuencia de resonancia ω_0 intermedia entre este valor de frecuencia y los armónicos típicos de línea. Un valor de $\omega_0 = 2\pi * 5.10^3 \text{ rad/s}$ puede considerarse como una buena relación de compromiso y en ese caso se pueden calcular valores de $L1 = L2 = 400 \ \mu H \ y \ C = 5 \ \mu F.$



Figura 5. Respuestas en frecuencia para (a) el filtro puramente inductivo y (b) para el filtro en configuración LCL.

3.3. Operación monofásica y bifásica

El diseño del inversor tiene en cuenta el hecho de que en el Ecuador los dos esquemas de distribución eléctrica domiciliaria más comunes son el monofásico con 120 V de tensión eficaz nominal entre fase y neutro y el bifásico en configuración contrafase con 220 V de tensión nominal entre fases. Este último esquema está expandiéndose fuertemente debido al creciente uso de cocinas de inducción las cuales debido a su alto consumo de potencia funcionan en su gran mayoría con 220 V. Se propone entonces una estructura para el inversor que permite fácilmente pasarlo de un formato a otro de funcionamiento con cambios circuitales mínimos. La Figura 6 muestra la estructura diseñada donde mediante un cambio en el control del inversor, el cual es realizado por un microprocesador, se puede hacer operar cada una de las ramas en sincronía o en contrafase. De esta manera, cada rama entrega la potencia nominal calculada para cada IGBT.

3.4. Diseño de disipadores y gabinete metálico

Toda la electrónica se monta dentro de un gabinete metálico que le permita ser fácilmente fijado por el instalador pudiendo ser ubicado incluso a la intemperie. Este último requerimiento hace que el material escogido para el gabinete sea aluminio ya que además

de la fortaleza mecánica, posee alta inmunidad a la corrosión y también es muy efectivo actuando como jaula de Faraday para las emisiones electromagnéticas típicas de los inversores de potencia. La mayor parte del espacio se dedica a la etapa de potencia la cual incluye a los módulos IGBT, los disipadores y los ventiladores. En la Figura 7 se muestra una sección del gabinete escogido donde se aprecia el montaje de los disipadores de manera longitudinal y los módulos IGBT adosados a cada uno de ellos. Dos requerimientos que son típicamente contradictorios aparecen en este tipo de diseño y es que al mismo tiempo que el gabinete debe permitir la instalación al exterior, se deben diseñar entradas y salidas de aire que permitan hacer circular un fluio de aire apropiado para la refrigeración de todo el sistema. Se decidió colocar entonces las tomas de aire para los ventiladores en la parte inferior del equipo dejando la salida por arriba. La salida se diseña con un sistema de ranuras de manera de que se permite la salida de aire, pero no el ingreso de agua. Adicionalmente se incorporan rejillas que hacen de filtro tanto a la entrada como a la salida de aire para evitar el ingreso de insectos y minimizar el ingreso de polvo a los disipadores. El canal central que queda en medio de los dos disipadores se dedica a toda la electrónica de sensado y control, así como a las fuentes de alimentación.



Figura 6. Circuito esquemático de las 2 ramas del inversor.



Figura 7. Disipadores y módulos IGBT dentro del gabinete de aluminio elegido.

4. Simulación de la operación del sistema

El funcionamiento de todo el sistema se prueba mediante un modelo desarrollado en MATLAB/Simulink. Esto permite realizar numerosos ajustes previos requeridos en el control de corriente, tipo de modulación, etc. Los cuales serían mucho más dificultosos de realizar directamente sobre el sistema real. El esquema de control desarrollado se basa en un algoritmo de MPPT que se encargará de extraer siempre la máxima potencia disponible en el panel fotovoltaico. Este algoritmo detecta el punto de operación en el cual se extrae la máxima potencia al panel y genera la ampli-

tud de referencia de corriente que el inversor invectará a las cargas domiciliarias y, de haber un excedente, a la línea eléctrica pública. La operación del inversor está pensada para ser a factor de potencia unitario, sin embargo, es factible operarlo a factores distintos de la unidad en caso de ser requerido. En este caso el inversor podría comportarse como filtro activo de potencia y el estudio en ese modo de funcionamiento está previsto en trabajos futuros. La Figura 8 muestra el esquema general de la simulación donde se pueden ver el bloque correspondiente al inversor NPC, el bus DC, y el filtro LCL de acoplamiento a la línea. Dentro del bloque de control se implementan todos los lazos requeridos para la operación del sistema así como un lazo de enclavamiento de fase (PLL, por sus siglas en inglés) que sirve como marco de referencia para la generación de fases y transformaciones vectoriales. El esquema mostrado incluye el control de solamente una fase ya que el control en operación bifásica resulta completamente simétrico.

La Figura 9 muestra la corriente entregada por el inversor para una referencia de 25 A lo cual equivale a una potencia de 3000 W. Esta corriente surge del cálculo de disipación máxima que se realiza para cada IGBT dejando un margen de seguridad. Cada fase puede entregar esta corriente por lo tanto, la capacidad total del inversor resulta de aproximadamente 6000 W independientemente de que opere en configuración monofásica o bifásica. De la gráfica puede observarse que la corriente obtenida está completamente en fase con la tensión de línea y su distorsión armónica total (DAT) resulta de 2,9 %.

En el ejemplo anterior se supuso tensión de línea completamente sinusoidal lo cual no es el caso típicamente encontrado en redes reales. En la Figura 10 se muestra el resultado de la simulación cuando se modela una tensión de línea con una DAT de 5,5 %.



Figura 8. Modelo del inversor implementado en MATLAB/Simulink.

En este caso se obtiene una corriente de línea aún en fase y con una DAT de 4,9 % mostrando que el control puede operar en condiciones no ideales de tensión dando incluso corrientes con DAT más bajas que la de la tensión de línea.



Figura 9. Corriente inyectada por el inversor y tensión de línea ideal.



Figura 10. Corriente inyectada por el inversor y tensión de línea con DAT = 5.5 %.

5. Resultados experimentales

Se presentan algunos resultados preliminares obtenidos con un prototipo que se encuentra funcionando en los laboratorios del Grupo de Investigación en Energías de la Universidad Politécnica Salesiana. Para facilitar el análisis y medición de las variables involucradas el prototipo no se monta todavía dentro del gabinete tal como se muestra en la Figura 11. El sistema es controlado por una tarjeta basada en el microprocesador ADSP-21369 de Analog Devices el cual procesa en tiempo real la información suministrada por los sensores de corriente y tensión y genera la acción de control necesaria [12]. La frecuencia de conmutación se estableció en 16 kHz, al igual que la de adquisición. El filtro LCL tiene los mismos valores calculados en la sección 3.2 y utilizados en la simulación, esto es: $L1 = L2 = 400 \ \mu H \ y \ C = 5 \ \mu F.$

En la Figura 12 puede verse la evolución de la tensión entregada por el inversor en el punto de acoplamiento con la carga estando ésta recibiendo potencia enteramente del inversor. En la Figura 13 se muestra la corriente inyectada por el inversor cuando se acopla a una tensión de línea con una DAT del 10 %. La amplitud de la corriente inyectada es de 11 A y la DAT resulta de 4,5 %.



Figura 11. Imagen del prototipo utilizado para las pruebas experimentales.



Figura 12. Tensión de salida del inversor (morado) y corriente en la carga (azul).



Figura 13. Corriente resultante (azul) cuando se acopla el inversor a una tensión de línea con DAT = 10 % (verde).

6. Conclusiones

El trabajo presenta el diseño y desarrollo de un inversor para aprovechamiento de la energía solar en instalaciones residenciales. Dentro de los criterios tomados en cuenta en el diseño se tienen la posibilidad de operar tanto en conexión monofásica como bifásica los cuales son los modos más comúnmente utilizados en la distribución eléctrica residencial en el Ecuador. En ambos casos puede suministrar una potencia de salida de 6000 W.

La operación fue probada mediante simulaciones ante condiciones ideales y no ideales en la tensión de línea obteniéndose corrientes de línea con DAT menores incluso a la DAT de la tensión de línea. Los resultados experimentales preliminares muestran que el sistema puede operar de manera estable cuando alimenta una carga y al mismo tiempo inyecta potencia hacia la línea. La eficiencia del sistema ha sido estimada en 94 % según las pruebas realizadas hasta el momento.

La operación típica del sistema diseñado es a factor de potencia unitario, sin embargo, futuros estudios prevén variantes en su control para poder operarlo con inyección de reactivos a la línea y actuar adicionalmente como filtro activo de potencia. El desarrollo presentado en este trabajo no incluye el uso de bancos de batería, pero se tiene contemplado la generalización del sistema para poder incorporar esa opción.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Proyecto Prometeo, dependiente de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (Senescyt), así como también a la Universidad Politécnica Salesiana por el apoyo institucional y financiero dado al desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] P. EnergyTrend. (2015, Sept) Price quotes updated weekly – PV spot prices.
- [2] International Energy Agency. (2015) 2014 snapshot of global PV markets. International Energy Agency.

- [3] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM) Std. 1547.2-2008, 2009.
- [4] IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.1-2005, 2005.
- [5] J. Viola and F. Quizhpi, "Desarrollo de un convertidor electrónico multinivel para aplicaciones de compensación de potencia reactiva," *Revista Técnica Energía*, no. 9, pp. 96–103, 2013.
- [6] J. Restrepo, J. Viola, and F. Quizhpi, "Banco de emulación de perfiles de viento para aplicaciones en energía eólica," *Revista Técnica Energía*, no. 11, pp. 77–84, 2015.
- [7] B. Babcsany, "Is the new german energy policy sustainable?" in 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), 6-8 Jun 2013, pp. 1–4.
- [8] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, Grid converters for photovoltaic and wind power systems. John Wiley & Sons, 2011, vol. 29.
- [9] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped pwm inverter," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, no. 5, pp. 518–523, 1981.
- [10] Vincotech, Transistores de compuerta aislada, Vincotech. [Online]. Available: http: //www.vincotech.com/uploads/tx_st9products/ 10-FZ07NMA100SM-M265F58-D1-14.pdf
- [11] J. Viola, J. Restrepo, F. Quizhpi, and J. Aller, "Predictive control of a three-phase power converter coupled with LCL filter," in *IEEE International Conference on Industrial Technology* (*ICIT*), 17-19 Mar 2015, pp. 2322–2326.
- [12] J. Viola, J. Restrepo, F. Quizhpi, M. Giménez, J. Aller, V. Guzman, and A. Bueno, "A flexible hardware platform for applications in power electronics research and education," in *Electrical Power Energy Conference (EPEC)*. IEEE, 1-6 Nov 2014.



Identification and GPC control of an AC motor using DSPACE

Identificación y control CPG de un motor de CA con Dspace

Juan Moreno-Peña^{1,*}, William Ipanaqué-Alama²

Abstract

Resumen

In the paper presented below, the focus is directed to the automation and control of an AC motor, as well as obtaining its mathematical model (in the form of transfer function) using DSPACE platform, which facilitates the realization of real time testing that is necessary to identify the process here presented. Once the model is obtained, we proceed to develop the design of a controller based on the Generalized Predictive Control (GPC) methodology. Finally, the controller designed was applied to the system coupled to a simulated load by an electromagnetic break. As it is known, the usage of these motors is widespread in the industry, this work is aimed to controlling the speed, its response to changes in set point and its response to the presence of disturbances.

Keywords: AC motor, DSPACE, GPC control, identification, predictive control

En el artículo que se presenta a continuación, el enfoque va dirigido a la automatización y control de un motor AC, así como a la obtención de su modelo matemático (en la forma de función de transferencia) utilizando la plataforma DSPACE, que facilita el desarrollo de pruebas en tiempo real que son necesarias para hacer la identificación del proceso aquí presentado. Una vez que el modelo es obtenido, se procede a desarrollar en diseño de un controlador basado en la metodología del Control Predictivo Generalizado (CPG). Finalmente, el controlador diseñado es aplicado al sistema acoplado a una carga simulada por un freno electromagnético. Como se sabe, el uso de estos motores está muy extendido en la industria, este trabajo está dirigido al control de su velocidad, su respuesta ante cambios en el valor de referencia v su respuesta ante la presencia de disturbios.

Palabras clave: Motor AC, DSPACE, control CPG, identificación, control predictivo.

^{1,*}Maestría en Ingeniería Mecánico Eléctrica con mención en Automática y Optimización – Universidad de Piura (UDEP) – Perú. Autor para correspondencia ⊠: juan.moreano@posgrado.udep.edu.pe

²Universidad de Piura (UDEP) – Perú.

Recibido: 03-04-2016, aprobado tras revisión: 24-05-2016

Forma sugerida de citación: Moreno, J. y Ipanaqué, W. (2016). «Identification and GPC control of an AC motor using Dspace». INGENIUS. N.°15, (Enero-Junio). pp. 66-72. ISSN: 1390-650X.

1. Introduction

The use of AC motors is widely extended in current industry; this is due, its main advantages: easy construction, small volume, low weight and low maintenance requirements; and their use and applications include roles on machine tools, conveyor systems, fans, compressors, etc., therefore adequate control is necessary to maintain production levels and energy consumption to acceptable ranges.

The tool used to develop this project is dSPACE platform, which is used in many different applications, including automotive, aerospace, commercial vehicles, electric drives, medical engineering, research and education, among others [1].

To get an idea of the magnitude and importance of this platform, we will mention that companies such as BMW, Bosh, Caterpillar, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Jaguar, Mazda, Michelin, Mitsubishi, Nissan, Paccar, Porsche, Renault, Rolls Royce Motor Cars, SCANIA, Suzuki, Toyota, Volkswagen, Volvo, Yamaha, and others use it. dSPACE platform environment also gives several tools for teaching and researching in several study fields [2].

Finally, it is worth mentioning the importance of obtaining models, because if this procedure is not carried on, when performing driver design tuning it is difficult and sometimes, it is not the most suitable. Identification allows to obtain a model in a methodical and systematic manner, so that the possibility of errors is reduced.

The contribution of this paper lies on the development and real time implementation of an advanced control strategy, as GPC control, on an induction motor drive system using dSPACE platform. This work sets a starting point for the development of other control methodologies using this platform.

2. Materials and Methods

2.1. dSPACE platform

2.1.1. System architecture

The dSPACE platform is composed by hardware and software. The software is a group of computer programs that requires suitable hardware for proper operation. This part also consists of a set of tools to perform control process development.

It involves working with MatLab®, as its libraries attach to the libraries available in Simulink software once installed [2]. Within these tools, it has a real time interface (RTI) software for testing and experimentation (including ControlDesk, which is what we used to develop our control process), software for measurement and calibration, and finally models for automotive simulation.

On hardware part, it works with an integrated controller board that is installed on the motherboard of a personal computer. There are several types of these boards with different specifications and potentialities, depending on the type of the process that the user wants to develop.

In our case we have the DS1104 controller board, which also uses a panel (Panel Connectors and LEDs) to make easier the connections between inputs and outputs processes. It is possible to resume dSPACE architecture in the scheme shown in Figure 1.



Figura 1. Servidor Web basado en Arduino [3].

2.1.2. ControlDesk software

This software provides all the functions for control, monitoring, experimental automation, and data capture [1], [3]. Therefore, it makes drivers development more efficient. From its interface the user can control the process in real time.

ControlDesk uses the block diagram of the process that is developed in Simulink [4], [5] using dSPACE libraries, which make possible to observe it, in real time, how the process responses vary when changing any relevant parameter.

2.1.3. DS1104 R&D Controller Board

It is a hardware piece that is installed in the PC motherboard [2]. It has been designed for high-speed multi-variable digital controllers development and for real time simulations in various study fields [6].

This controller board complements the computer to develop systems able to perform faster control. Its input and output interfaces make it ideal for the development of a wide variety of control techniques. Control and real time processing is possible because it is internally divided into functional blocks that allow faster processing.

It also has analog-to-digital (ADC) and digital-toanalog (DAC) converters to facilitate communication with external hardware, allowing data collection in real time.

2.1.4. CP1104 Connector and LED Panel (CLP)

This panel provides easy access to all inputs and outputs of the DS1104 controller board, so that devices can be easily connected or disconnected with analogue connectors (coaxial type) or digital connectors (sub-D type) [7].

In addition, this panel has a number of LED lights in which the signals status can be seen. In Figure 2 the quantity and types of connectors that are available in this panel are shown.

BNC Connectors	Sub-D Connectors
8 ADC inputs	Digital I/O
8 DAC outputs	Slave DSP I/O
	 Incremental encoder interfaces
	 Serial interfaces

Figura 2. Available connectors in CLP [7].

2.2. System description

The system to be considered is the one formed by the inverter, the AC motor, and the rotary encoder. It is schematized in Figure 3.



Figura 3. System schematic.

2.2.1. AC motor

The motor used in this project is shown in Figure 4.



Figura 4. AC motor.

This motor has a squirrel cage rotor and has been fitted with a rotary encoder that allows, once connected to the CLP, to take information of rotor speed in real time. The manufacturer is the Brazilian company WEG and its specifications are shown in Table 1.

Tabla 1. Motor data plate information

Power Frequency	3 H 60 I	IP Hz
Voltage	Delta connection: 220 V	Star connection: 380 V
Current	Delta connection: 9.5 A	Star connection: 5.5 A
RPM	1730	

2.2.2. Frequency inverter

The frequency inverter used here is shown in Figure 5, and it is from the manufacturer Delta Electronics INC. model VFD C2000. It is an device with different control modes for AC motors. It has been set to V/F control mode and it is used as the actuator in the system.



Figura 5. 3-phase frequency inverter.

2.2.3. Rotary encoder

To acquire RPM information, rotary encoder HE50B-8-1024-3-N-24 from manufacturer HANYUNG NUX (shown in Figure. 6) was used.

2.3. Process identification

There are several techniques available to perform system identification, the one presented here is a Linear Parametric Identification technique. This method was selected based on its ease of implementation and due to the possibility of having sufficient data available (input and output data) from the system.



Figura 6. Rotary encoder.

MatLab provides us with the System Identification Tool, which is a specific toolbox designed to help us throughout system identification and it is one of the main software's we used. To accomplish with the modeling of the system, response of the group drivemotor-encoder is first evaluated and the range of input voltages in which it has a linear response was observed.

Then we proceeded to build a Binary Pseudo Random Sequence (PRBS) signal. Finally using System Identification Tool from MatLab, different approaches of the process were obtained and the one with the highest fit percentage was selected.

2.3.1. System linearity

To determine the range in which the system has linear behavior, different voltage inputs were applied (as step inputs) to the open-loop system and the speed of the motor (RPM), for each voltage input that was registered. This information is summarized in Table 2 and then a corresponding figure was prepared in order to be able to easily see the range of values where the system has linear behavior.

Tabla 2. Voltage input and motor RPM data.

Voltage (V)	Motor RPM
0.2	360
0.25	449
0.3	539
0.35	628
0.4	718
0.45	807
0.5	896
0.55	985
0.6	1075
0.65	1164
0.7	1254
0.75	1343
0.8	1432
0.85	1522
0.9	1611

The corresponding graph is shown in Figure 7. Note that the linearity is preserved in all analyzed range; therefore, it was set that identification would be performed between 0.3 V and 0.7 V.

2.3.2. PRBS signal and system response

To prepare the PRBS signal, it is necessary to know the time constant of the process. In order to get this information, a step input was applied to the system, as shown in Figure 8. The green line represents step input and the red line, system response.

In Figure 8, the 63.2% of the set point corresponds to 616 RPM, and it was reached in 3.5 seconds. The maximum period of the PRBS signal must be such as to allow the system response to reach the steady state; therefore, it should be around 3.5 seconds.



Figura 7. Motor RPM vs. input voltage.



Figura 8. System response to a step input.

Regarding to the minimum signal period, it should be enough to collect system information in small time intervals so we opted for a minimum signal period of 1/4 of the time constant, this is 0.875 seconds.

A 300 seconds length PRBS signal was developed in order to have enough information for the identification process.



Figura 9. PRBS signal.

2.3.3. Identification

System response to the PRBS signal shown above is presented in Figure 10.



Figura 10. Signal response to PRBS signal.

With the information contained in Figure 9 and Figure 10 we can use System Identification Tool to perform system identification.

In Figure. 11 the five models obtained are shown.



Figura 11. System Identification Tool results.

The best approach was obtained using an Auto-Regressive Exogenous (ARX) model (1), reaching 85.86% fit.

$$P_{(z)} = \frac{0.145z^{-1} + 0.295z^{-2} + 0.213z^{-3} +}{1 - 0.794z^{-1} + 0.123z^{-2} +} + \frac{+0.78z - 4 + 8.425z^{-5}}{+0.114z^{-3} - 0.443z^{-4}}$$
(1)

2.4. Controller design

The GPC controller scheme we selected requires the calculation of polynomials R, S and T, necessary for its implementation; we used the equations shown in [8] to develop an iterative program in MatLab and calculate them.

2.4.1. Parameters calculation

After carrying out several tests varying control horizon and lower and upper costing horizons, and by varying the quality/energy ratio in the cost function, the following values were selected:

Lower costing horizon: $N_1 = 1$ Upper costing horizon: $N_2 = 500$ Control horizon: $N_u = 500$ Quality constant: $\delta = 1$ Energy constant: $\lambda = 10$

With these values, the following parameters were obtained for the controller:

$$T = 0.000566$$

$$R(z^{-I}) = 0.9882 - 0.9609z^{-1} - 0.942z^{-2} + 0.8646z^{-3}$$

$$S(z^{-I}) = 0.1029 - 0.0184z^{-1} + 0.0127z^{-2} + 0.0128z^{-3} - 0.0455z^{-4}$$

2.5. Load simulation

In order to perform a more exhaustive analysis of the controller, the process is subjected to a load simulation (applied as disturbances and on an intermittent basis) achieved by coupling an electromagnetic brake (shown in Figure 12) to the AC motor shaft.



Figura 12. Electromagnetic brake.

3. Results and Discussion

3.1. Controller response

ControlDesk allows us to observe system data in real time. Figure 13 shows that motor speed (red line) corresponds to the values defined by the set point (green line), so we can conclude that the controller design was adequate.



Figura 13. Controller response.

3.2. Controller response to load simulation

To load simulation the electromagnetic brake described above was used. Load was simulated intermittently, in order to observe the regulation of speed against an applied load.



Figura 14. Controller response to load simulation.

Figure 14 shows variations in rotor speed when load is applied. It is easily seen that when load is applied, RPM decreases and the controller proceed to increase velocity to recover the set point value.

On the other hand, when load is removed, RPM tends to increase as torque is high but the controller reduces velocity and the system returns to the set point.

4. Conclusions

We have successfully used dSPACE controller board DS1104, ControlDesk software and MatLab/Simulink to obtain the mathematical model of the system we presented in Figure 3. We were able to find the parameters to perform identification and to make the necessary adjustments in order to achieve the best possible fit percentage.

Likewise, this paper has described the process of development and implementation of a GPC strategy for an induction motor drive system to perform speed control. We have seen the system response to set point variations and its response to load variations, in both cases the controller has shown a good response, so its performance was verified.

Finally, we also demonstrated the capacity of dSPACE platform to accomplish real time control and we can conclude that this platform is a powerful tool for the development of different control methodologies.

Referencias

 Z. A. Ghani, M. A. Hannan, and A. Mohamed, "Simulation model of three-phase inverter using dSPACE platform for PV application," *International Review on Modelling and Simulation* (*I.RE.MO.S.*), vol. 5, pp. 137–145, 2012.
- P. M. Menghal and A. J. Laxmi, "Real time control of electrical machine and drives: A review," *International Journal of Advances in Engineering* & Technology, vol. 1, pp. 112–126, 2011.
- [3] J. Versele, O. Deblecker, and J. Lobry, Implementation of Induction Motor Drive Control Schemes in MATLAB/Simulink/dSPACE Environment for Educational Purpose, K. Perutka, Ed. InTech, 2011.
- [4] M. Jemli, H. B. Azza, and M. Gossa, "Real-time implementation of irfoc for single-phase induction motor drive using dspace ds 1104 control board," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, 2009.
- [5] A. Soria, R. Garrido, I. Vásquez, and R. Vásquez, "Architecture for rapid prototyping of visual controllers. robot auton syst," *Robotics and Au*tonomous Systems, vol. 54, pp. 486–495, June 2006.
 [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S0921889006000121.
- [6] *dSPACE Catalog 2014*, dSPACE GmbH., Paderborn, Germany, 2014.
- [7] ControlDesk Experiment Guide, dSPACE GmbH, Paderborn, Germany, 2008.
- [8] D. W. Clarke, C. Mohtadi, and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control - Part I. The basic algorithm," *Automatica*, vol. 23, pp. 137–148, 1987.



Normas para publicar en la revista Ingenius

Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

Aspectos generales

- 1. Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.
- 2. La revista INGENIUS publica artículos relacionados con investigaciones culminadas, revisiones bibliográficas, informes de desarollo tecnológico, ensayos científicos, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología.
- 3. La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos en español e inglés; es decir, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico.
- 4. Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.
- 5. Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.
- 6. Es indispensable presentar una carta dirigida al Consejo Editorial autorizando a la revista INGENIUS la publicación de la investigación, dando fe de la originalidad y de ser autor de la misma. Además, debe consignar constancia o credencial que confirme la adscripción a la Universidad o centro de investigación, tal como lo confirma el artículo.

- Como reconocimiento a su aporte, a cada autor se le remiten dos ejemplares de la edición en la cual se publica el artículo.
- 8. El artículo propuesto se debe remitir a: <revistaingenius@ups.edu.ec> o <jcalle@ups.edu.ec>.
- 9. El sitio de consulta de ediciones anteriores de la revista es http://ingenius.ups.edu.ec/

Requerimientos técnicos

- 10. Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word[®](.doc o .docx) o $\text{LAT}_{\text{E}}X$ (.tex). Las plantillas a ser utilizadas pueden ser descargadas del sitio web de la revista.
- 11. Las ilustraciones y tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas.
- Cuando presente el artículo, no intente diseñar el manuscrito. Use un tamaño de letra de 12 puntos en todo el manuscrito. Justifique el margen derecho.
- 13. Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.
- 14. Use doble "enter" al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use "enter" en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.
- 15. No centre encabezamientos o subencabezamientos y déjelos estar alineados a la izquierda.
- 16. Las tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento, pero deben estar guardadas en un archivo separado. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será aproximadamente de 21 x 28 cm,

entonces sus tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

Instrucciones para preparación de manuscritos

17. El manuscrito no debe tener más de 5000 palabras de extensión e incluir algunos o todos los siguientes elementos:

Encabezamiento

- Título
- Autores y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja
- Resumen en español e inglés
- Palabras clave en español e inglés

Cuerpo del trabajo

- Introducción
 - Fundamentación
 - Definiciones
 - Revisión de literatura
 - Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis
- Materiales, fuentes y métodos
 - Recopilación de datos
 - Tratamiento de las variables
 - Análisis estadístico
- Resultados
- Discusión
- Conclusiones

Referencias bibliográficas

Referencias

Material adicional

- Elementos gráficos
- Tablas
- Agradecimientos
- 18. El artículo debe incluir en el encabezado: el 'Título', a continuación se debe informar los datos de cada uno de los autores con nombre completo, y con referencia al final de la página el título universitario de pregrado y el de posgrado más alto obtenido, cargo e institución donde labora, números telefónicos (convencional y celular), la dirección y correo electrónico. Si hay más que

un autor, indicar quien es el autor a quien la correspondencia debe ser enviada.

- 19. El 'Resumen' y el 'Abstract' deben ser en español e inglés, respectivamente en todos los manuscritos; deben ser de un solo párrafo, corto y conciso (máximo de 250 palabras) y resumir los resultados del artículo. Deben ser informativos no indicativos.
- 20. Las palabras clave serán de tres a seis y representarán los principales temas del artículo y deberán ser colocadas al final del resumen.
- 21. Las secciones de 'Introducción', 'Materiales y métodos', 'Resultados', 'Discusión' y 'Conclusiones' del artículo pueden estructurarse divididas en diferente forma. Si el artículo describe un estudio efectuado en un área particular, esta debe ser escrita en subencabezamientos bajo 'Materiales y métodos'.
- 22. Los 'Resultados', 'Discusión' y 'Conclusiones' pueden ser en algunos casos combinados.
- 23. Los 'Agradecimientos' deben ser cortos, no deben exceder de un párrafo y se colocan al final del artículo.
- 24. Para la integración de citas dentro del artículo, debe usarse un corchete con un número en el interior, el mismo que hará referencia al documento de citación que constar en la bibliografía [1], y se irá colocando de forma ascendente. Cuando se trata de citas textuales se escribirá entre comillas con el texto en cursiva y a continuación se colocar el corchete con el número que corresponda siguiendo el formato de la IEEE.
- 25. Las 'Referencias bibliográficas' se colocan al final del texto, luego de la sección de conclusiones.
- 26. Las 'Referencias bibliográficas' se colocan ordenadas en orden de citación, de acuerdo el estilo de la IEEE.
- 27. Se debe verificar con cuidado que todas las citas colocadas en el texto, aparezcan en la lista de 'Referencias bibliográficas'. En la lista solo deben aparecer las referencias que fueron utilizadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras, esto implica que no deben aparecer otras referencias aunque el autor las haya consultado durante la preparación del artículo.

28. La sección de 'Referencias bibliográficas' deberá incluirse en un archivo aparte sobre LATEX, proporcionando un archivo de información bibliográfica (.bib); o si el artículo está escrito sobre Microsoft Word[®] u otro procesador de texto, añadir una tabla en Microsoft Excel[®](.xls o .xlsx). De esta manera, el formato de la revista para las referencias se coloca automáticamente, tal y como se muestra en algunos ejemplos a continuación.

Referencias

- R. Balasubramani and V. Kannan, "Efficient use of MPEG-7 color layout and edge histogram descriptor in CBIR systems," *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 157–163, 2009.
- [2] S. Berretti, A. Del Bimbo, and P. Pala, "Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 225–239, 2000.
- [3] L. Graham, Introduction to Mechanical Measurements, Houston, 2006. [Online]. Disponible en: http://cnx.org/content/col10385/1.1/
- [4] T. Kijak, T. Furon, and L. Amsaleg, "Deluding image recognition in SIFT-based CBIR systems," in Multimedia in Forensics, Security and Intelligence (MiFor), Florence, Italy, October 29 2010.
- [5] M. Kozlowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, M. Muzyczek, and J. Barriga, "Future of natural fibers, their coexistence and competition with man-made fibers in 21st century," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 556, no. 1, 2012.
- [6] D. Tahmoush, "CBIR for mammograms using medical image similarity," Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, vol. 7628, p. 8, 2010.
- [7] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, G. Jing, D. Yu, and S. Wang, "Effects on surface properties of natural bamboo fibers treated with atmospheric pressure argon plasma," *Surface and interface analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1211–1217, 2006.

Para más detalles consultar: <http://www.ieee.org/documents/ ieeecitationref.pdf>

Preparación de las figuras

- 29. Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi.
- No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.
- 31. Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación.
- 32. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.
- 33. Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.
- Dibujos lineales y mapas deben ser preparados con tinta negra.
- 35. El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.
- 36. Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.
- 37. Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf)

Procedimiento editorial

Para la publicación de artículos en la revista INGENIUS, su presentación y revisión se realiza con dos procedimientos:

38. Cuando el artículo ha sido recibido por el editor responsable, una primera revisión se realiza dentro de un consejo editorial interno que determinará la pertinencia y solvencia científica del documento presentado, si este es aceptado en esta revisión se pasa al siguiente proceso.

- 39. El segundo proceso de revisión es la evaluación por expertos nacionales o extranjeros considerando el método *blind review* considerando los siguientes pasos:
 - Al artículo se le asigna un número.
 - El editor asigna el artículo a un miembro del consejo editorial interno, quien supervisará el proceso de revisión.
 - El miembro del consejo editorial interno asignado solicitará dos o más revisores para el artículo.
 - Una vez revisado el artículo, el revisor remitirá el informe hacia el miembro del consejo editorial interno en forma digital.
 - El miembro del consejo editorial interno hace recomendaciones en base a todas las revisiones.
 - Posteriormente el miembro del consejo editorial interno, presenta los formatos de revisión completos al editor responsable con las recomendaciones.
 - El editor confirma o discute las recomendaciones.

- Una vez confirmado, el editor informa las recomendaciones al autor y hace llegar los comentarios de la revisión.
- El editor hace llegar una copia de las recomendaciones y comentarios de la revisión al miembro del consejo editorial interno y a todos los revisores.
- 40. Las revisiones para la revista INGENIUS son realizadas anónimamente; el autor recibe únicamente los comentarios de los revisores.
- 41. Si el revisor rechaza un artículo, se da una apropiada retroalimentación a el(los) autor(es).
- 42. El(los) autor(es) tiene una única oportunidad para mejorar un artículo haciendo las revisiones y correcciones necesarias; por lo tanto reciben de los revisores claros, concisos y completos comentarios para mejoras.

Comentario final

43. La revista INGENIUS publica dos números por año en los meses de diciembre y junio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos para su revisión.



Guidelines for publication in the Ingenius Journal

The papers submitted to the INGENIUS journal must be adjusted to the following criteria:

General criteria

- 1. Papers written by national or foreign researchers could be published if they accomplish the required scientific quality.
- 2. INGENIUS journal publishes articles related to complete research, literature reviews, reports of technological development, scientific papers, proposals for models and innovations and thesis results as long as they are a contribution to the field of Science and Technology.
- 3. The journal publishes original papers in English or Spanish, that is, they should not have been published before through any printed or electronic means.
- 4. All papers will undergo a rigorous process of arbitration and the evaluation, made according to the following criteria: originality, relevance, timeliness, contributions, scientific rigor and compliance with established publishers.
- 5. Being an arbitrated publication, the Editorial Board approves its publication based on the concept of specialized pairs. The receipt of a paper does not imply commitment to be published.
- 6. It is necessary to present a letter to the Editorial Board, authorizing the journal's publication of the research, attesting to the originality and to being the author of it. In addition, recorded evidence or credentials must be given to confirm the affiliation to the university or research center, as it is stated in the paper.
- 7. In recognition of his or her contribution, each author will receive two copies of the edition in which the paper is published.
- 8. The proposed paper should submitted to: <revistaingenius@ups.edu.ec> or

<jcalle@ups.edu.ec>.

9. The site to access previous published journals is: $$\rm <htp://ingenius.ups.edu.ec/>$

Technical requirements

- Articles must be written using Microsoft Word[®] (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex). The templates to be used can be downloaded from the journal website.
- 11. The illustrations and tables should be numbered sequentially and include a narrative description for each. The equations in the article should also be numbered.
- 12. When submitting the article, do not try to design the manuscript. Use a font size of 12 points in the entire manuscript. Justify the right margin.
- 13. Use space after periods, commas and question marks.
- 14. Use double "enter" at the end of each paragraph and heading title. Do not use "enter" anywhere else, let the word processing program automatically break the lines.
- 15. Do not center headings or subheadings and let them be left aligned.
- 16. Tables should be created in the same program used for the body of the document, but must be stored in a separate file. Use tabs, not spaces, to create columns. Remember that the final size of printed pages is approx. 21 x 28 cm, and that your tables should be designed to fit the space of the final print.

Instructions for preparing manuscripts

17. The manuscript should be no more than 5000 words in length and include some or all of the following elements:

Header

- Title
- Authors and their institutional affiliation
- Abstract in English and Spanish
- Keywords in English and Spanish

Body of work

- Introduction
 - Substantiation
 - Definitions
 - Review of the literature
 - Formulation of objectives and development of hypotheses
- Materials, sources and methods
 - Data collection
 - Treatment of the variables
 - Statistical analysis
- Results
- Discussion
- Conclusions

Bibliography references

• References

Additional material

- Graphic elements
- Tables
- \bullet Acknowledgment
- 18. The article must include the header title, and then the information from each of the authors: below the header the full name, and at the button of the page: the title, undergraduate degree and the highest obtained graduate degree, position and institution where the author works, telephone numbers (conventional and cellular), address and email. If more than one author exists, indicate who the principal author is to whom correspondence should be sent.
- 19. The 'Abstract' should be in Spanish and English, respectively; all manuscripts must be a single paragraph, short and concise (maximum 250 words) and summarize the results of the article. The abstract should be informative not indicative.
- 20. There will be three to six keywords to represent the main topics of the article and these should

be placed at the end of the abstract.

- 21. The sections of 'Introduction', 'Materials and methods', 'Results', 'Discussion' and 'Conclusions' may be structured differently. If the article describes a study in a particular area, it must be described in a subheading under 'Materials and methods'.
- 22. 'Results', 'Discussion' and 'Conclusions' can be combined in some cases.
- 23. 'Acknowledgment' should be short, not to exceed one paragraph and placed at the end of the paper.
- 24. When using citations in the article, you must use a bracket with a number inside which would be included in the literature eg. [1], and it would be placed in ascending order. Textual citations must be used with quotation marks in italics and then use a bracket with the corresponding number in the IEEE format.
- 25. 'References' are placed at the end of the text, after the concluding section.
- 26. Las 'References' are placed and sorted in order of appearance.
- 27. It should be checked carefully that all citations are placed in the text and appear in the list of 'References'. In the list should appear only references that were used in the main body of the paper, in tables or figures; this means that no other references should appear, even those ones that the author has consulted for the preparation of the article.
- 28. The section 'References' should be included in a separate file, for LATEX, provide the bibliographic information file (.bib); or if the article is written on Microsoft Word[®] or another word processor add a table on Microsoft Excel[®] (.xls or .xlsx). Thus the references format of the journal are automatically positioned, as shown in examples below.

References

 R. Balasubramani and V. Kannan, "Efficient use of MPEG-7 color layout and edge histogram descriptor in CBIR systems," *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 157–163, 2009.

- [2] S. Berretti, A. Del Bimbo, and P. Pala, "Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 225–239, 2000.
- [3] L. Graham, Introduction to Mechanical Measurements, Houston, 2006. [Online]. Disponible en: http://cnx.org/content/col10385/1.1/
- [4] T. Kijak, T. Furon, and L. Amsaleg, "Deluding image recognition in SIFT-based CBIR systems," in *Multimedia in Forensics, Security and Intelligence* (*MiFor*), Florence, Italy, October 29 2010.
- [5] M. Kozlowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, M. Muzyczek, and J. Barriga, "Future of natural fibers, their coexistence and competition with man-made fibers in 21st century," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 556, no. 1, 2012.
- [6] D. Tahmoush, "CBIR for mammograms using medical image similarity," Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, vol. 7628, p. 8, 2010.
- [7] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, G. Jing, D. Yu, and S. Wang, "Effects on surface properties of natural bamboo fibers treated with atmospheric pressure argon plasma," *Surface and interface analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1211–1217, 2006.

For more details see: <http://www.ieee.org/documents/ ieeecitationref.pdf>

Preparation of figures

- 29. Figures may be line drawings, maps and half tone photographs in black and white or color resolution of 300 dpi.
- 30. Do not combine photographs and line drawings in the same figure.
- 31. Design figures to eventually fit to the final size of the journal 21 x 28 cm. Make sure the registration or details as well as lines are set with appropriate sizes and thicknesses so that they are not unreadable when reduced to its final size. (numbers, letters and symbols should be reduced at least 2.5 high after the pictures have been reduced to fit the printed page). Ideally, line art should be prepared to approximately one quarter of its final size of publication.

- 32. Different elements in the same figure should be spelled a, b, c, etc.
- 33. The photographs must be recorded with high contrast and high resolution. Remember that pictures often lose contrast in the printing process.
- 34. Line drawings and maps should be prepared with black ink.
- 35. The text figures and maps should be written in letters easily legible.
- 36. If the figures have been previously used, it is the responsibility of the author to obtain a permit to avoid further problems related to copyright.
- 37. Each figure must be submitted in a separate file, either as a bitmap (.jpg, .bmp, .gif, or .png) or vector graphic (.ps, .eps, .pdf)

Editorial procedure

For publication of articles in the INGENIUS, submission and review is carried out with two procedures:

- 38. When the item has been received by the editor, a first review takes place with in a national editorial board to determine the relevance and scientific soundness of the submission, if this is accepted in this review it passes to the next process.
- 39. The second review process is the evaluation by national or foreign experts using the blind-review method following the next steps:
 - The article is assigned a number.
 - The editor assigns the article to an internal editorial board member, who will oversee the review process.
 - The internal editorial board member assigns the article to two or more reviewers.
 - After reviewing the article, the reviewer forwards the report to the internal editorial board member in a digital format.
 - The internal editorial board member makes recommendations based on the reviews.
 - Subsequently, the internal editorial board member presents the complete review formats to the editor with the recommendations
 - The editor confirms or discusses the recommendations.

- Once confirmed, the publisher informs the author of there commendations and gets feedback from the review.
- The editor makes a copy of the recommendations and commentaries which were made by the internal editorial board member and all the reviewers.
- 40. The reviews for the INGENIUS journal are made anonymously. The author receives only the reviewers' comments.
- 41. If the reviewer rejects a paper, there is a proper feedback to the author.

42. The author has a unique opportunity to improve an article by making revisions and corrections, so the reviewers use clear, concise and complete comments for improvements.

Final comment

43. The INGENIUS journal publishes two issues per year in the months of December and June, so it is important to consider the dates for submission of articles for review.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Javier Herrán Gómez, sdb Rector

©Universidad Politécnica Salesiana Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja Casilla postal 2074 Cuenca, Ecuador Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Fax: (+593 7) 408 89 58 Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a: Secretaría Técnica de Comunicación Universidad Politécnica Salesiana Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja Casilla postal 2074 Cuenca, Ecuador Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182 Fax: (+593 7) 408 89 58 Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec www.ups.edu.ec Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología, publicación semestral, N.º 15, Enero/Junio 2016 Editor responsable: John Calle Sigüencia.

Diseño, diagramación y maquetación ${\rm eatric} T_{\rm E} X$

Andrés P. Sarmiento / Universidad Politécnica Salesiana

Fotografía de portada Centro de Mecanizado CNC / Universidad Politécnica Salesiana

Diseño de portada e impresión Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres. Teléfono: (+593 7) 283 17 45 Cuenca – Ecuador Correo electrónico: centrograficosalesiano@lns.com.ec