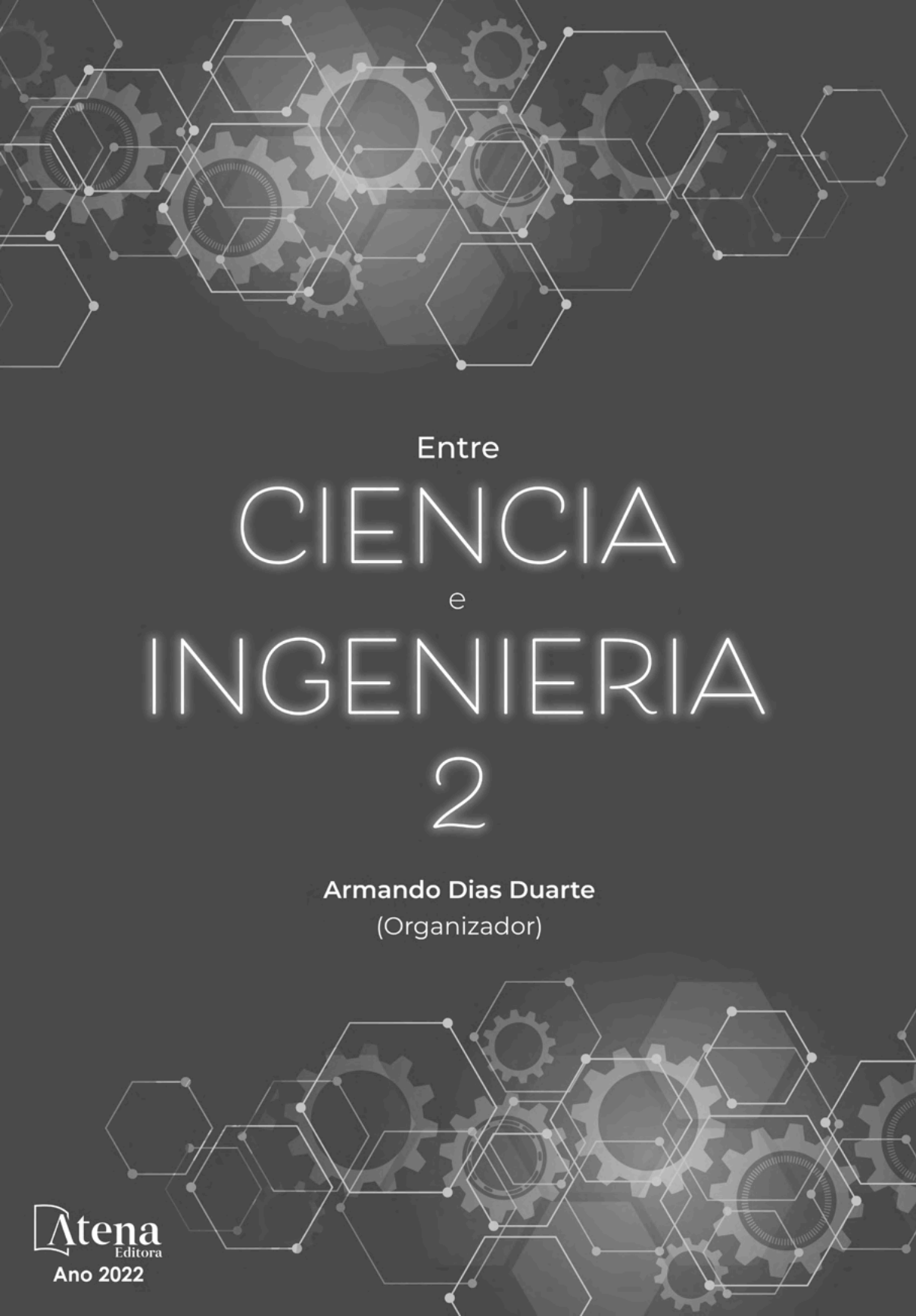
The background of the cover is a vibrant blue gradient. It is decorated with a complex pattern of glowing green and cyan lines forming hexagons and interconnected gears. Some gears are solid, while others are outlines, creating a sense of depth and technical precision. The overall aesthetic is modern and scientific.

Entre
CIENCIA
e
INGENIERIA
2

Armando Dias Duarte
(Organizador)



Entre
CIENCIA
e
INGENIERIA
2

Armando Dias Duarte
(Organizador)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Yaidy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Armando Dias Duarte

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E61 Entre ciencia e ingenieria 2 / Organizador Armando Dias Duarte. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0259-6

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.596222405>

1. Ciencia. 2. Ingenieria. I. Duarte, Armando Dias (Organizador). II. Título.

CDD 501

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

O conjunto de trabalhos intitulado “*Ciencia e Ingenieria 2*” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de diversos trabalhos que compõe seus capítulos. O volume abordará de forma categorizada e interdisciplinar, pesquisas cujos resultados possam auxiliar na tomada de decisão, tanto no campo acadêmico, quanto no profissional.

Os trabalhos desenvolvidos foram realizados em instituições de ensino e pesquisa no México, e nos capítulos apresentados, são encontrados estudos de grande valia com temas que relacionam os recursos hídricos, ferramentas que auxiliam nos aspectos da gestão, discussões a respeito do processo de ensino e aprendizagem, segurança e empreendedorismo.

A composição dos temas buscou a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos (as), mestres (as) e todos (as) aqueles (as) que de alguma forma se interessam pela área da Engenharia Civil, através de temáticas atuais com resoluções inovadoras, descritas nos capítulos da coleção. Sendo assim, a divulgação científica é apresentada com grande importância para o desenvolvimento de toda uma nação, portanto, fica evidenciada a responsabilidade de transmissão dos saberes através de plataformas consolidadas e confiáveis, como a Atena Editora, capaz de oferecer uma maior segurança para os novos pesquisadores e os que já atuam nas diferentes áreas de pesquisa, exporem e divulgarem seus resultados.

Armando Dias Duarte

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

CULTURAS DEL AGUA. REFLEXIONES DESDE LA INTERCULTURALIDAD, CUENCA Y SOCIO-ECOSISTEMA

Alejandro Sainz Zamora

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224051>


CAPÍTULO 2..... 13

PLANIFICACIÓN BASADA EN EL SERVICIO ECOSISTEMICO HÍDRICO ANTE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL ESTERO JALTEPEQUE, EL SALVADOR

Laura Benegas Negri

Marta Vilades Ribera

Ney Rios Ramirez


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224052>

CAPÍTULO 3..... 24

RESPUESTA HIDRÁULICA Y MECÁNICA EN UNA TURBOMÁQUINA Y SU RELACIÓN CON FENÓMENOS SUBSINCRÓNICOS

Hernán Darío Bolaños-Arias

Francisco Javier Botero-Herrera

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224053>


CAPÍTULO 4..... 37

CÓDIGOS DE ÉTICA Y CONDUCTA, HERRAMIENTAS FUNDAMENTALES PARA LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA MUNICIPAL

Teresa Reyes Zepeda

Mónica Leticia Acosta-Miranda

Esmeralda Gutiérrez López

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224054>


CAPÍTULO 5..... 49

LAS TICS Y SU RELACIÓN CON LOS PROCESOS DE ENSEÑANZA - APRENDIZAJE

Carlos Ernesto Gavilondo Rodríguez.

Angiemarie Rivera.

Exi Resto de León

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224055>


CAPÍTULO 6..... 58

DESARROLLANDO COMPETENCIAS DIGITALES DOCENTES EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE: FORMACIÓN DEL PROFESOR 2.0

María Alejandra Sarmiento Bojórquez

Mayte Cadena González


Juan Fernando Casanova Rosado

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224056>

CAPÍTULO 7..... 74

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ESCOLAR MODALIDAD VIRTUAL Y PRESENCIAL EN LA UNIDAD DE APRENDIZAJE DE FÍSICA BÁSICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE


Mayté Cadena González
María Alejandra Sarmiento Bojórquez
Juan Fernando Casanova Rosado

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224057>

CAPÍTULO 8..... 88

LA MODELACIÓN MATEMÁTICA COMO UN RESULTADO DE APRENDIZAJE TRANSVERSAL EN EL PROCESO FORMATIVO DEL INGENIERO


Vicente Sandoval Rojas
Emilo Cariaga López
Valeria Carrasco Zúñiga
Soledad Yáñez Arriagada
Ciro González Mallo
Héctor Iturra Chico

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224058>

CAPÍTULO 9..... 99

RESULTADOS DE APRENDIZAJE EN CURSOS DE CIENCIAS BASICAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UCTEMUCO CONTRIBUYENDO A LA OPTIMIZACION DEL PROCESO FORMATIVO


Carmen Soledad Yáñez
Valeria Carrasco
Vicente Sandoval
Ciro González
Héctor Turra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5962224059>

CAPÍTULO 10..... 110

EFFECTO DE LA TÉCNICA DE DESHIDRATACIÓN SOBRE EL CONTENIDO DE COMPUESTOS BIOACTIVOS DE *Tropaeolum tuberosum*


Tamara Fukalova
Villacrés Poveda Elena
Alemán Reyes Julissa
Almeida Shapán Rita

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59622240510>

CAPÍTULO 11..... 126

BIOTRATAMIENTO DE SUELO CONTAMINADO POR ACEITE RESIDUAL AUTOMOTRIZ: UN RESIDUO PELIGROSO

Blanca Celeste Saucedo Martínez
Liliana Márquez Benavides
Gustavo Santoyo
Juan Manuel Sánchez-Yáñez


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59622240511>

CAPÍTULO 12..... 135

IDENTIFICACIÓN DEL RAQUIS DE MAÍZ COMO MATERIAL ADSORBENTE DE HIDROCARBUROS

Cesar Luis Redonda Deceano

David Reyes González

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59622240512>

CAPÍTULO 13..... 143

CARACTERIZACIÓN Y DESEMPEÑO EN RETARDANCIA A LA FLAMA DE MEZCLAS PE/EVA CON COMBINACIONES DE Mg(OH)₂, KERATINA Y AGENTE INTUMESCENTE (ADN)


Saúl Sánchez valdes

J. Alvite-Ortega

E. Ramirez-Vargas

L.F. Ramos deValle


J.G. Martínez-Colunga

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59622240513>

CAPÍTULO 14..... 159

EMPRENDIENDO

Javier Darío Canabal Guzmán

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59622240514>

SOBRE O ORGANIZADOR..... 177

ÍNDICE REMISSIVO..... 178

CAPÍTULO 3

RESPUESTA HIDRÁULICA Y MECÁNICA EN UNA TURBOMÁQUINA Y SU RELACIÓN CON FENÓMENOS SUBSINCRÓNICOS

Data de aceite: 01/05/2022

Hernán Darío Bolaños-Arias

Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería
Medellín, Colombia
<http://orcid.org/0000-0002-9545-1861>

Francisco Javier Botero-Herrera

Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería
Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-5254-1517>

RESUMEN: La teoría de sistemas permite inferir que algunas inestabilidades hidrodinámicas en una turbomáquina se pueden detectar en su respuesta hidráulica y mecánica. Esto es particularmente conveniente para el mantenimiento y diagnóstico técnico de este tipo de máquinas. En este trabajo se analizó la respuesta hidráulica y mecánica de una bomba centrífuga de baja velocidad específica, y su relación con fenómenos subsincrónicos como el Rotating Stall y el surge. Los resultados obtenidos sugieren la existencia de los dos fenómenos con frecuencias del 2.4% al 8.7% de la frecuencia de rotación del impulsor, en dos zonas diferentes de la curva característica $Q_{nd}-E_{nd}$. Para llegar a estos resultados se hizo uso de análisis espectral de señales de presión y de torque, y análisis de fase de las fluctuaciones de presión en la voluta de bomba.

PALABRAS CLAVE: Rotating Stall, surge, análisis espectral, análisis de fase.

HYDRAULIC AND MECHANICAL RESPONSE IN A TURBOMACHINE AND ITS RELATIONSHIP WITH SUBSYNCHRONOUS PHENOMENA

ABSTRACT: The theory of systems allows to infer that some hydrodynamic instabilities in a turbomachine can be detected through its hydraulic and mechanical response. This is particularly convenient for the maintenance and technical diagnosis of this type of machines. In this work, the hydraulic and mechanical response of a low specific speed centrifugal pump, and its relationship with subsynchronous phenomena such as Rotating Stall and surge, was carried out. Results obtained suggest the existence of the two phenomena with frequencies of 2.4% to 8.7% of the rotation frequency of the impeller. This, in two different zones of the characteristic curve $Q_{nd}-E_{nd}$. To achieve these results, spectral analysis of pressure and torque signals and phase analysis of the pressure fluctuations in the pump volute were used.

KEYWORDS: Rotating Stall, surge, spectral analysis, phase analysis.

1 | INTRODUCCIÓN

Fenómenos hidrodinámicos en una turbomáquina pueden afectar su desempeño en forma de reducción de eficiencia, presencia de altos pulsos de presión y aumento de niveles de vibración (BERTEN *et al.*, 2009) lo cual se pone de manifiesto en la respuesta hidráulica, mecánica y eléctrica (VALENTÍN *et al.*, 2017).

Fenómenos hidrodinámicos como el

surge y el Rotating Stall (RS) han sido estudiados ampliamente en turbocompresores porque estos se presentan muy cerca del punto de máxima eficiencia (LAWLESS; FLEETER, 1997), en la línea que separa el desempeño estable del inestable y que se denomina línea de surge en la curva de desempeño. En bombas hidráulicas también se presentan (BONS, 1994; BRAUN, 2009; BRENNEN, 2011), pero no cerca del punto de máxima eficiencia. El hecho de que el surge y RS se puedan presentar en un mismo punto de operación (DAY, 2015) ha generado investigaciones que reportan el RS como precursor del surge y otras que reportan el surge sin relación con el RS (SUNDSTRÖM; SEMLITSCH; MIHĂESCU, 2018).

El surge es un fenómeno global mientras que el RS es un fenómeno local (LAWLESS; FLEETER, 1997). En surge el caudal promedio a través de la turbomáquina es variable, mientras que en RS es estable (DAY, 2015). Dada la naturaleza global del surge, que trasciende la zona del impulsor y se extiende a todo el sistema de bombeo, este se caracteriza por oscilaciones de presión y caudal que, además de generar vibraciones y reducir el desempeño de la turbomáquina, pueden amenazar su integridad estructural (BRENNEN, 2011).

De otra parte, el RS se puede definir como una perturbación del flujo debida a recirculaciones que bloquean parcial o totalmente los canales entre álabes de los rotores o impulsores. Estas recirculaciones se dan por desprendimiento de flujo en la interfase fluido-superficie sólida de los álabes por cambio en la dirección del ángulo de ataque (BRENNEN, 2011).

En bombas, tanto el surge como el RS se presentan en condiciones de operación de bajos caudales y a frecuencias subsíncronas. Dada sus naturalezas periódicas, su caracterización se hace, entre otros métodos, por medio del análisis espectral y análisis de fase de las fluctuaciones de presión (BERTEN *et al.*, 2009; BRAUN, 2009; HASMATUCHI *et al.*, 2011; LI; XU; HU, 2015). Los sensores se colocan normalmente en el impeler o en la voluta y el análisis de sus señales considera fundamentalmente la respuesta hidráulica de la turbomáquina. No obstante, los pulsos de presión generados por los fenómenos pueden repercutir también en los componentes mecánicos y eléctricos de la turbomáquina. Dada esta situación, resulta de interés conocer la respuesta de una turbomáquina en el ámbito mecánico ante la existencia de fenómenos subsíncronos como el surge o el RS.

Teniendo en cuenta lo anterior, se definió como objetivo principal de esta investigación la caracterización de fenómenos hidrodinámicos subsíncronos como el RS a partir de la respuesta hidráulica y mecánica de una bomba centrífuga de baja velocidad específica, haciendo uso de sensores de presión y de torque.

2 | MÉTODOS

2.1 Banco de pruebas

El banco de pruebas hace parte del laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT y está conformado por un circuito cerrado de tuberías unido a un tanque de carga, un canal y la bomba objeto de estudio. La dirección del flujo en el circuito se puede controlar por medio de válvulas, posibilitando el funcionamiento de la turbomáquina objeto de estudio como bomba o como turbina. La energía para mover el agua en el circuito es suministrada por un banco de bombas. La bomba objeto de estudio corresponde a una ITT-Goulds de 1118.5 W de potencia nominal, con una velocidad específica (N_s) de 35.7, con seis álabes curvados hacia atrás y una velocidad de rotación de diseño de 29.167 s^{-1} . En el punto de operación de diseño la cabeza hidráulica es de 7.7 m y el caudal de $0.009 \text{ m}^3/\text{s}$.

La bomba de estudio fue operada a su velocidad de diseño, y para la obtención de diferentes puntos de operación se hizo variación de caudales desde $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $1.38 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. Para este estudio fueron considerados 22 puntos de operación con cabezas hidráulicas entre 5.7 y 9.6 m.

2.2 Instrumentación y equipo de adquisición de datos

Sensores piezorresistivos de presión Wika A-10 (PiezoResistive Sensor, PRS, por su denominación en inglés) fueron instalados en la zona de alta y de baja presión de la bomba. Un medidor de flujo GE TransPort PT878 fue instalado en la zona de descarga de la bomba. Las señales de estos instrumentos fueron utilizadas para determinar la energía específica por medio de la ecuación de Bernoulli y calcular los caudales en cada punto de operación.

Los sensores de presión piezorresistivo Futek PMP300 (PiezoResistive Sensor, PRS, por su denominación en inglés) y piezoeléctrico Dytran 2005V (PiezoElectric Sensor, PES, por su denominación en inglés) fueron instalados en la voluta. Sus señales fueron analizadas en el dominio del tiempo y de la frecuencia y los resultados se consideraron como patrón de comparación de los resultados obtenidos a través del sensor de torque Futek TRS600 FSH01998 (Torque Sensor, TS, por su denominación en inglés), el cual fue instalado en el eje de la bomba. Este sensor sirvió, además, para la determinación de la potencia mecánica. El tacómetro DT2234C+ fue usado para medir la velocidad de rotación en el eje de la bomba.

Las señales eléctricas de todos los instrumentos fueron recibidas y procesadas por medio de un equipo de adquisición de datos CompactRio® 9076 de National Instruments® y un software denominado Turbologger, desarrollado en ambiente LabView® por investigadores de la Universidad Eafit. El equipo de adquisición de datos se conformó con cuatro módulos de adquisición: dos NI-9232, un NI-9215 y un NI-9203. Las especificaciones técnicas generales de los módulos se pueden ver en las referencias (Datasheet NI-9215NI,

[s. d.]; Datasheet NI-9203[s. d.]).

Todas las señales fueron registradas simultáneamente a una tasa de 20480 muestras por segundo y constituidas por 655360 datos (32 segundos) para cada una de las variables consideradas en cada punto de operación; tales parámetros corresponden a una frecuencia máxima observable de 10240 Hz con una resolución de 0.03125 Hz.

2.3 Curvas características

Las curvas características de la bomba fueron construidas con números adimensionales, de acuerdo con lo establecido en la norma IEC-60193:2019 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2019). Para ello se utilizaron los coeficientes de energía (E_{nD}) y caudal (Q_{nD}), y eficiencia (η), definidos de la siguiente manera:

$$E_{nD} = \frac{E}{n^2 D^2} \quad (1)$$

$$Q_{nD} = \frac{Q_1}{nD^3} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} \quad (3)$$

donde, E es la energía específica; n en número de revoluciones por segundo; D es el diámetro de referencia; Q_1 es el caudal; P_h es la potencia hidráulica y P_m es la potencia mecánica.

2.4 Análisis de fase

El análisis de señales se realizó en tres partes. En la primera, se tomaron las señales de los sensores instalados en la máquina, y por medio de análisis espectral se determinaron los puntos donde se sugiere la existencia de RS. En la segunda, se analizó la similitud de las señales de todos los sensores por el método del espectro cruzado. Y en la tercera, se realizó un análisis de fase por el método de la correlación cruzada para estimar el número de onda en cada uno de los componentes espectrales de interés.

Las señales de presión fueron representadas adimensionalmente como coeficientes de fluctuación de presión (\tilde{P}_E) y sus frecuencias como coeficientes de frecuencia (f_n), definidos de acuerdo con la norma IEC60193:2019 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2019) de la siguiente forma:

$$\tilde{P}_E = \frac{p - \bar{p}}{\rho E} \quad (4)$$

$$f_n = \frac{f}{n} \quad (5)$$

donde, p es la presión, \bar{p} es la presión media, ρ es la densidad y f es la frecuencia.

3 I RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Curvas características

En la figura 1 se presentan las curvas características E_{nd} - Q_{nd} y η - Q_{nd} . En ellas se observan tres puntos de operación de interés (Operation Point, OP, por su denominación en inglés), OP4, OP7 y OP11, ubicados en la zona de carga parcial de caudal. En el OP4 ($Q_{nd}=0.1124$, $E_{nd}=16.84$) hay un cambio de signo de pendiente en la curva E_{nd} - Q_{nd} . En el OP7 ($Q_{nd}=0.2095$, $E_{nd}=16.78$) y el OP11 ($Q_{nd}=0.4109$, $E_{nd}=15.78$) hay unos leves hundimientos claramente perceptibles en la curva η - Q_{nd} .

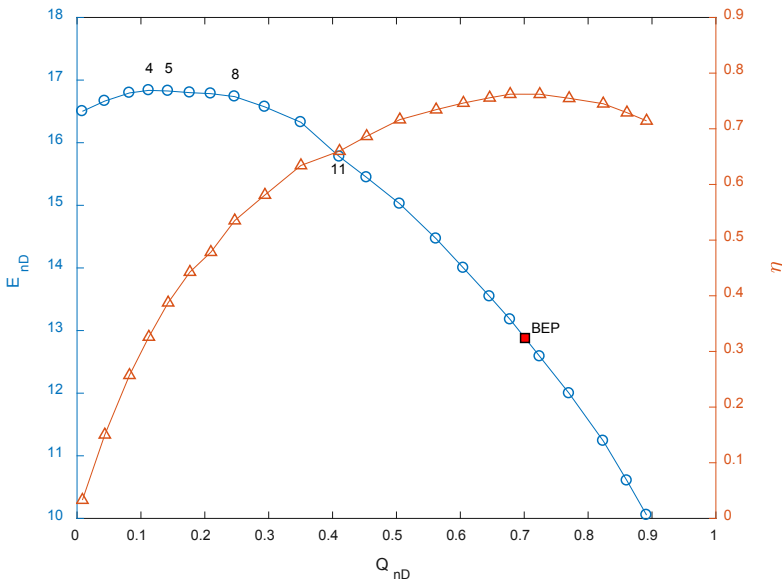


Figura 1. Curvas características E_{nd} - Q_{nd} y η - Q_{nd} . Fuente: elaboración propia.

Estos hundimientos representan una disminución en la eficiencia, estimada entre el 1 y 1.5%, si se toma como base de comparación una curva que se ajuste a los puntos aledaños a los puntos en cuestión. La literatura sugiere que este tipo de irregularidades o cambios en el signo de la pendiente pueden estar asociados a fenómenos hidrodinámicos (SINHA; PINARBASI; KATZ, 2001; ULLUM *et al.*, 2006).

3.2 Análisis espectral

El análisis de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia se realizó sobre todos los puntos de operación. De allí se identificaron cuatro puntos con componentes espectrales que sugieren la presencia de fenómenos hidrodinámicos caracterizados por variaciones de presión que se manifiestan en todo el sistema hidráulico y mecánico. Dos de estos puntos corresponden a los OP4 y OP11, donde se identificaron irregularidades en las curvas E_{nD} - Q_{nD} y η - Q_{nD} . Los otros dos puntos, OP5 y OP8, son próximos a las zonas de irregularidades en las curvas características. Por tratarse de fenómenos subsincrónicos, el análisis espectral se hizo sobre componentes espectrales con frecuencias menores que 29 Hz o coeficientes de frecuencia menores que 0.99.

A modo de ilustración, en la figura 2 se presentan los espectros de las señales de todos los sensores en los puntos de operación OP5 y OP8. En la figura 2 a) se observa claramente un componente en $f_n=0.087$ en todos los espectros. De manera similar, en la figura 2 b) se observa uno en $f_n=0.084$. De acuerdo con estos espectros, la respuesta hidráulica tiene correspondencia con la respuesta mecánica, ya que los componentes espectrales corresponden al mismo coeficiente de frecuencia y tienen una amplitud claramente diferenciable en esos componentes.

En la tabla 1 se presentan los puntos de operación identificados con sus respectivos coeficientes de frecuencia para cada uno de los sensores. En el OP 11 se presentaron dos componentes espectrales de interés, uno de los cuales tiene correspondencia en todos los sensores ($f_n=0.0241$), y el otro en los cuatro sensores de presión ($f_n=0.0777$) y no en el de torque. Este componente será objeto de análisis más adelante.

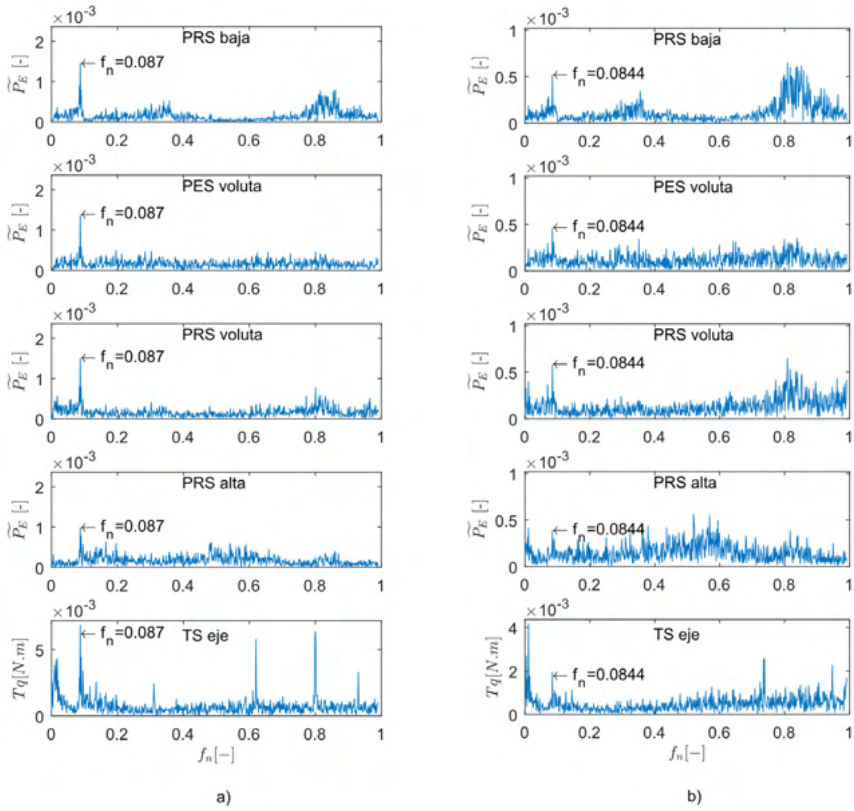


Figura 2. Espectros de las señales en los puntos de operación 5, a), y 8, b).

Fuente: elaboración propia.

OP	Q_{nd}	E_{nd}	Factor de frecuencia (f_n)				
			PRS baja	PES voluta	PRS voluta	PRS alta	TS eje
4	0.1124	16.8358	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857
5	0.1426	16.8259	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870
8	0.2468	16.7360	0.0844	0.0844	0.0844	0.0844	0.0844
11	0.4109	15.7761	0.0241	0.0241	0.0241	0.0241	0.0241
11	0.4109	15.7761	0.0777	0.0777	0.0777	0.0777	0.0817

Tabla 1. Puntos de operación y componentes espectrales donde la evidencia sugiere la existencia de fenómenos subsincrónicos.

Para determinar si los componentes espectrales identificados en la tabla 1 corresponden a frecuencias dominantes percibidas en todos los sensores, y a su vez, poderlos comparar entre sí, se utilizó el método del espectro cruzado para este fin. Se tomó como señal patrón la señal del sensor piezoeléctrico instalado en la voluta (PES voluta) y con base en esta se realizó la correlación espectral con las otras señales. En la figura 3 se presentan estos resultados en el intervalo de f_n entre 0 y 0.2, en términos del espectro de densidad de potencia (Power Spectral Density, PSD, por su denominación en inglés). El intervalo escogido corresponde a la zona donde se identificaron los componentes espectrales comunes a todas las señales.

El método del espectro cruzado permite determinar la similitud entre dos señales, y de esta manera, identificar los componentes espectrales dominantes, caracterizados por tener cantidades de “masa” espectral (potencia o energía, en realidad) significativamente mayor que la de otros componentes.

En las gráficas de la figura 3 se puede observar que hay una gran similitud, en términos de preponderancia del componente espectral y su magnitud de densidad espectral, entre la señal del PES voluta y las otras señales, en lo que atañe a los componentes espectrales de interés señalados en la tabla 1. Para todos estos componentes espectrales es mayor la densidad espectral de la señal del sensor de torque, excepto en el caso de $f_n=0.0777$ del OP11, donde la densidad espectral es prácticamente la misma en todos los sensores. En este componente cabe resaltar que, si bien el espectro de la señal de torque no lo mostró como predominante, el espectro cruzado si lo hizo, presentando una clara semejanza de este componente en las señales de torque y de presión. De allí se pone de manifiesto que el componente espectral refleja el mismo fenómeno hidrodinámico en las señales de los dos sensores.

Dicho lo anterior, se infiere que los fenómenos hidrodinámicos, caracterizados por los componentes espectrales señalados en la tabla 1, tienen respuestas equiparables en los sistemas hidráulico y mecánico de la bomba objeto de estudio.

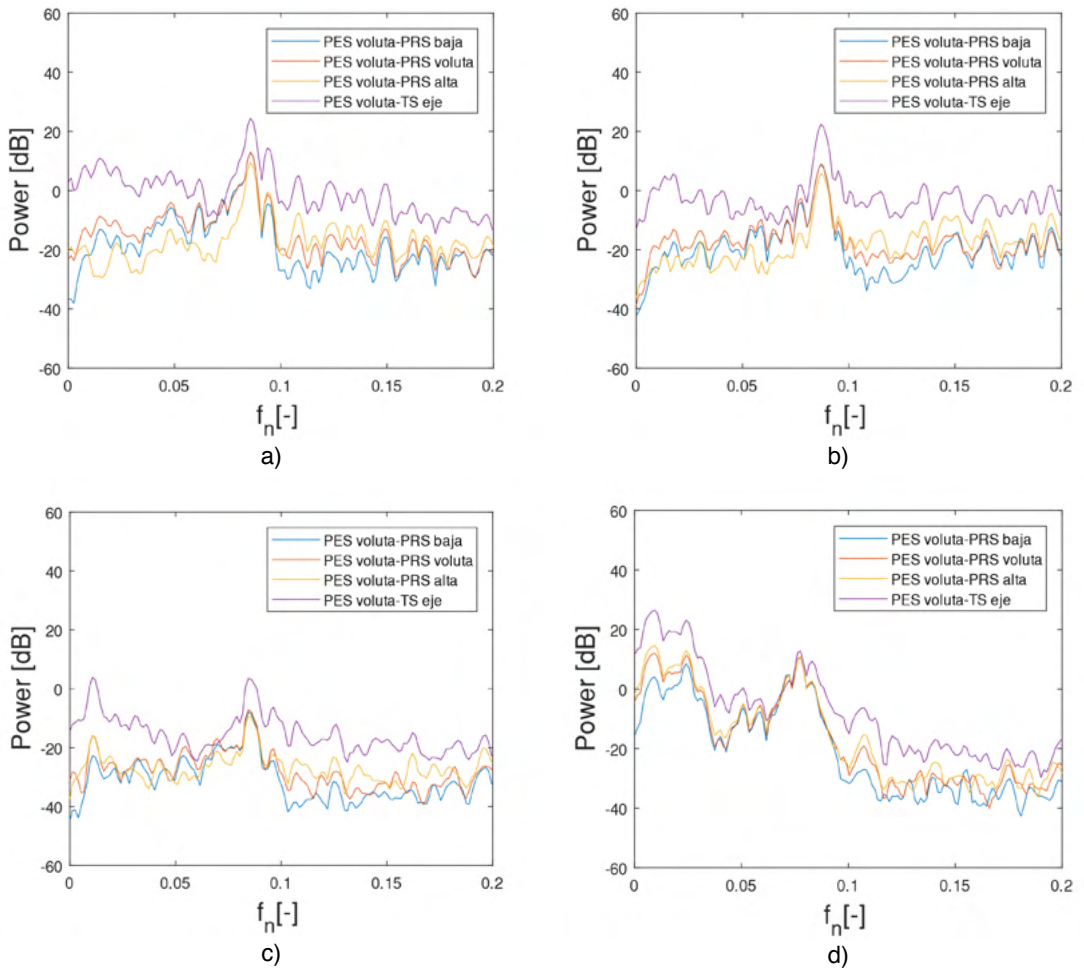


Figura 3. a) PSD para el OP4, b) PSD para el OP5, c) PSD para el OP8 y d) PSD para el OP11.

Fuente: elaboración propia.

3.3 Análisis de fase

Estudios sobre RS en bombas centrífugas reportan el fenómeno a frecuencias entre el 5 y 10% de las frecuencias de rotación del impulsor (JOHNSON; PEDERSEN; JACOBSEN, 2005; SINHA; PINARBASI; KATZ, 2001; ULLUM *et al.*, 2006). Sin embargo, y teniendo en cuenta que fenómenos como el surge se asemejan al RS y se pueden confundir con éste (DAY, 2015), se realizó un análisis de fase para dilucidar el origen de los componentes espectrales de interés. Para ello se consideraron las señales de los dos sensores de presión localizados en la voluta y que se instalaron con una separación de 30° . Las señales fueron filtradas digitalmente por los métodos Elíptico, Butterword, Chebychev tipo 1 y Chebychev tipo 2. La respuesta en amplitud y fase de la señal filtrada se comparó

gráficamente con la señal original para determinar el método más adecuado para estimar el número de onda en cada uno de los componentes de interés. Se usaron filtros pasabanda en todos los componentes, excepto en $f_n=0.0241$ donde se usó un pasabajo. El ancho de banda empleado en todos los casos fue de 1Hz centrado con respecto al componente espectral de interés en cada punto de operación. En la figura 4 se muestran las comparaciones de las señales filtradas con las originales para el OP5 a modo de ejemplo.

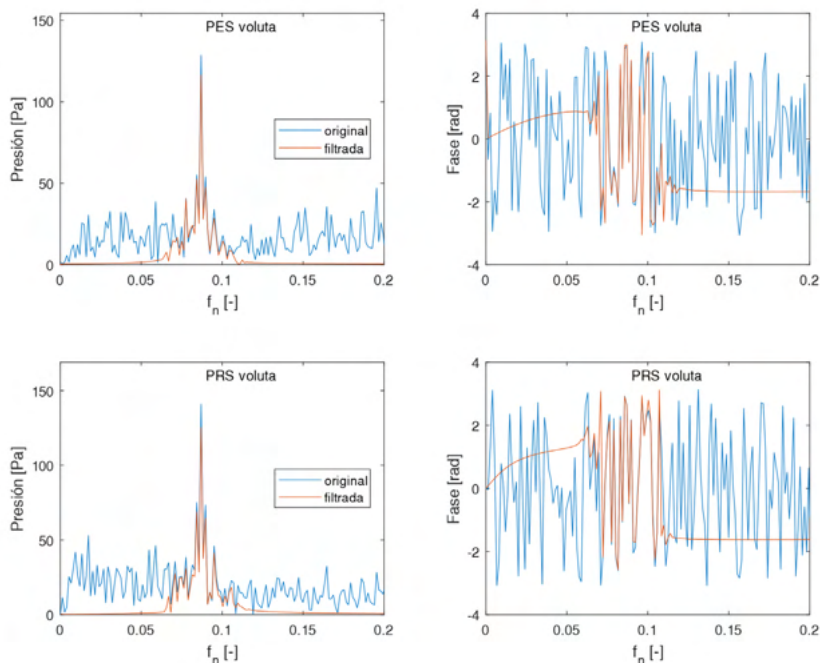


Figura 4. Respuesta en amplitud y en fase de las señales filtradas para el OP5, $f_n=0.0870$. Fuente: elaboración propia.

Los resultados del análisis de fase se presentan en la tabla 2. De los cinco componentes analizados, dos estarían en fase ($k=0$) y tres no estarían en fase ($k>0$). Los componentes en fase sugieren oscilaciones de presión y caudal que involucran todo el sistema hidráulico, posiblemente un surge, y los componentes que no están en fase sugieren la existencia de un RS.

OP	Q_{nD}	E_{nD}	f_n	Desfase (°)	Método de filtrado	k	k ajustado
4	0.1124	16.8358	0.0857	18.7	Elíptico	0.581	1
5	0.1426	16.8259	0.0870	19.5	Butterword	0.581	1

8	0.2468	16.7360	0.0844	7.5	Butterword	0.423	0
11	0.4109	15.7761	0.0777	7.5	Elíptico	0.386	0
11	0.4109	15.7761	0.0241	38.5	Elíptico pasabajo	1.283	1

Tabla 2. Análisis de fase para los componentes espectrales de interés.

4 | CONCLUSIONES

Estudios previos realizados sobre la misma máquina han sugerido, a partir de análisis de patrones espectrales generales, la existencia de RS. Esto en la zona comprendida entre $Q_{nd}=0.101$ y $Q_{nd}=0.143$ (BOLAÑOS *et al.*, 2017). Sin embargo, los resultados obtenidos en la presente investigación sugieren que el fenómeno también se puede encontrar en otra zona de la curva característica $Q_{nd}-E_{nd}$ (alrededor de $Q_{nd}=0.4109$). Además, los resultados muestran la posible presencia de otros fenómenos hidrodinámicos como el surge, fenómeno que no fue identificado en el estudio referenciado.

Los puntos de operación analizados (OP4, OP5, OP8 y OP11) muestran que los efectos de los fenómenos hidrodinámicos presentes en la turbomáquina se pueden percibir en los sistemas hidráulico y mecánico, traspasando la zona de interacción rotor-estator. Adicionalmente, comprueban una buena correspondencia en los componentes espectrales de las señales de los sensores de presión con las señales del sensor de torque.

En el OP11 se observan dos fenómenos hidrodinámicos diferentes, un posible surge y un posible RS, lo cual no resulta extraño si se tiene en cuenta que esta situación ha sido observada en turbocompresores (DAY, 2015). En este punto de operación llama la atención la existencia de un posible RS a una frecuencia muy baja, a 2.4% de la frecuencia de rotación de la máquina, por debajo de lo encontrado en los estudios de referencia para este trabajo.

La posible existencia de fenómenos hidrodinámicos como el surge o el RS en los OP7 y OP11 sugieren una reducción en la eficiencia del 1 al 1.5%. Los OP7 y OP11 son los puntos donde se observan unos leves hundimientos en la curva característica.

Si bien la coexistencia simultánea de fenómenos en fase (surge) y en no fase (rotating stall) es reportada por la literatura para el caso de compresores (DAY, 2015), en máquinas hidráulicas esta situación no ha sido mencionada, por lo cual la recolección de evidencias que permitan concluir sin lugar a duda que estos dos fenómenos se pueden presentar simultáneamente en máquinas hidráulicas se puede convertir en un tema de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su gratitud a la Dirección de Investigación, el laboratorio de Hidráulica, el laboratorio de Metrología y el laboratorio de Mecatrónica de la universidad EAFIT, por todo el soporte técnico y logístico brindado para el desarrollo de

esta investigación.

REFERENCIAS

BERTEN, Stefan *et al.* Experimental investigation of flow instabilities and rotating stall in a high-energy centrifugal pump stage. *In:* , 2009. **Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Conference 2009, FEDSM2009**. [S. l.: s. n.], 2009. p. 505–513.

BOLAÑOS, Hernán Darío *et al.* Subsynchronous phenomena in a low specific speed centrifugal pump. *In:* , 2017, Quito. **Proceedings of III Latinamerican Hydro Power and Systems Meeting**. Quito: [s. n.], 2017. p. 26–38.

BONS, Jeffrey P. Dynamic surge behavior of a centrifugal pumping system. *In:* , 1994. **American Society of Mechanical Engineers (Paper)**. [S. l.]: Publ by ASME, 1994. p. 1–11.

BRAUN, Olivier. **Part load flow in radial centrifugal pumps**. 2009. 177 f. - ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, [s. l.], 2009.

BRENNEN, Christopher Earls. Pump Vibration. *In:* HYDRODYNAMICS OF PUMPS. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 137–171.

DAY, I. J. Stall, surge and 75 years of research. **Journal of Turbomachinery**, [s. l.], v. 138, n. 1, p. 1–16, 2015.

HASMATUCHI, Vlad *et al.* Experimental Evidence of Rotating Stall in a Pump-Turbine at Off-Design Conditions in Generating Mode. **Journal of Fluids Engineering**, [s. l.], v. 133, n. 5, p. 051104, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests (IEC 60193:2019)**. [S. l.]: BSI Standards Limited, 2019.

JOHNSON, D. A.; PEDERSEN, N.; JACOBSEN, C. B. Measurements of rotating stall inside a centrifugal pump impeller. *In:* , 2005. **Proceedings of 2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2005**. [S. l.: s. n.], 2005. p. 1436–1443.

LAWLESS, P. B.; FLEETER, S. Prediction of active control of subsonic centrifugal compressor rotating stall. **AIAA Journal**, [s. l.], v. 35, n. 12, p. 1829–1836, 1997.

LI, Changzheng; XU, Siqi; HU, Zhiqi. Experimental Study of Surge and Rotating Stall Occurring in High-speed Multistage Axial Compressor. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 99, p. 1548–1560, 2015.

NI. **Datasheet NI-9203**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.ni.com/pdf/manuals/374070a_02.pdf. Acesso em: 13 mar. 2021.

NI. **Datasheet NI-9215**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.ni.com/pdf/manuals/373779a_02.pdf. Acesso em: 13 mar. 2021.

SINHA, Manish; PINARBASI, Ali; KATZ, Joseph. The flow structure during onset and developed states of rotating stall within a vaned diffuser of a centrifugal pump. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 123, n. 3, p. 490–499, 2001.

SUNDSTRÖM, Elias; SEMLITSCH, Bernhard; MIHĂESCU, Mihai. Generation Mechanisms of Rotating Stall and Surge in Centrifugal Compressors. **Flow, Turbulence and Combustion**, [s. l.], v. 100, n. 3, p. 705–719, 2018.

ULLUM, Ulrik *et al.* Prediction of rotating stall within an impeller of a centrifugal pump based on spectral analysis of pressure and velocity data. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 36–45, 2006.

VALENTÍN, David *et al.* Power swing generated in Francis turbines by part load and overload instabilities. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 12, 2017.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aceite residual automotriz 126, 127, 128, 130, 132

Administración pública municipal 37, 38, 42, 43, 46

Agua 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 26, 107, 108, 114, 116, 119, 122, 129, 130, 139, 141, 142, 148, 150, 153

Análisis de fase 24, 25, 27, 32, 33, 34

Análisis espectral 24, 25, 27, 29

Aprendizaje 9, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 57, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 109, 164, 166, 172

B

B-caroteno 110, 113, 114, 115, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124

Bienestar humano 13

BIENESTAR HUMANO 8

C

Carotenoides 114, 115, 124

CAROTENOIDES 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125

CÓDIGOS DE ÉTICA Y CONDUCTA 41, 45

Competencia digital 58

Control interno 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 166

Covid-19 74, 75, 85, 86, 87

Culturas 1, 6, 7, 9, 11, 12, 164

CURSOS CIENCIAS BÁSICA 99

D

Deshidratación 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 123, 125

E

E-learning 63, 74, 75, 79, 86, 87

Enfoque cuantitativo 49

F

Formación del ingeniero 97

Formación por competencias 99

M

Métodos 14, 25, 26, 32, 49, 68, 78, 106, 113, 114, 115, 117, 119, 120, 121, 122, 124, 128, 167

México 1, 4, 5, 11, 37, 38, 47, 48, 58, 59, 65, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 86, 126, 127, 133, 134, 136, 138, 139, 143, 158

Microorganismos 8, 127, 131, 136

MINERALIZACIÓN 127, 128, 131, 132

Modelación matemática 88, 89, 90, 98

P

Planificación de cuencas 13

Plantas 2, 8, 127, 130

R

Rendimiento escolar 54, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 84, 85, 86, 87

Residuo peligroso 126, 127, 128, 132

Resultado de aprendizaje 88, 90, 97

Rotating stall 24, 25, 34, 35, 36

S

Socioconstructivismo 88, 91, 94

Soluciones basadas en la naturaleza 13

Suelo 9, 14, 17, 18, 19, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133

Surge 24, 25, 32, 33, 34, 35, 36, 76, 167

T

TIC 58, 60, 66, 71, 73, 86, 87, 100

Tuberculo mashua 110

V


Valor nutritivo 110

W





Web 2.0 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 71, 72, 73


Z

Zonificación territorial 13



Entre
CIENCIA
e
INGENIERIA
2

 www.arenaeditora.com.br
 contato@arenaeditora.com.br
 @arenaeditora
 www.facebook.com/arenaeditora.com.br




Entre


CIENCIA


e


INGENIERIA

2

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br