

REVISTA IBEROAMERICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Mecánica Fundamental, Mecanismos y Máquinas
Robótica

Vibraciones y Acústica

Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas

Máquinas y Motores Térmicos

Ingeniería del Transporte y Vehículos

Fabricación, Metrología, Mantenimiento y Calidad

Estructuras y Materiales



*Revista Técnica de la
Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
EDUCACIÓN A DISTANCIA

OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo fundamental de la REVISTA IBEROAMERICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA es proporcionar un medio de comunicación entre los ingenieros y científicos que trabajan en la investigación y el desarrollo en el vasto campo de la Ingeniería Mecánica, y fomentar los lazos de colaboración entre los países iberoamericanos.

La Revista publica trabajos originales, tanto teóricos como experimentales, que aporten nuevas ideas o técnicas relacionadas con cualquiera de las áreas de la ingeniería mecánica, como son: mecánica fundamental, teoría de máquinas y mecanismos, tribología, robótica, vibraciones, mecánica de fluidos, turbomáquinas, vehículos, fabricación, metrología, mantenimiento, calidad, estructuras, materiales, métodos numéricos y diseño asistido por computador.

INFORMACIÓN PARA AUTORES

IDIOMAS	Los artículos se publicarán en español o portugués, incluyendo en ambos casos el título, un <i>abstract</i> y palabras claves en inglés
ENVÍO	Los artículos se enviarán por correo electrónico, en formato Microsoft Word, al Editor Técnico de la Revista (ribim @ ind.uned.es). De los artículos que resulten aceptados se deberá enviar la versión definitiva en Microsoft Word.
FORMATO DE PRESENTACIÓN	Los artículos se mecanografiarán a doble espacio, a una columna y con márgenes amplios. Se numerarán las páginas correlativamente, sin incluir ningún otro encabezamiento o pie de página. La primera página contendrá, en primer lugar, el título del trabajo, que se procurará que sea breve pero descriptivo. A continuación, los nombres de los autores, con su filiación y dirección completa. Seguidamente se incluirá una nota en la que se indique el número total de páginas, y el número de figuras y tablas que contiene el artículo. Finalmente se habrá de incluir el nombre, dirección y teléfono del autor al que se enviará la correspondencia, así como las pruebas de imprenta, caso de superar la revisión, si es posible con indicación del número de fax y la dirección de correo electrónico. Si la longitud del título es mayor de 40 caracteres, se incluirá también un título abreviado, de hasta 40 caracteres, para encabezamientos. La segunda página comenzará con un breve resumen, de no más de 300 palabras, al que seguirán las palabras clave (máximo 5), la introducción y el desarrollo del artículo, los agradecimientos, si los hay, la bibliografía y los apéndices. Al final se incluirá una traducción del título y las palabras clave al inglés, y un <i>abstract</i> en el mismo idioma. Los apartados se mecanografiarán en línea independiente, centrados, letra mayúscula y negrilla. Los subapartados también irán en línea independiente y letra negrilla, pero en minúscula y alineado al margen izquierdo. Si se desea numerar los apartados y subapartados, se empleará el sistema decimal, 1, 1.1, 1.1.1, etc.
UNIDADES	Se utilizará el Sistema Internacional de Unidades.
ECUACIONES	Las ecuaciones se mecanografiarán formando parte del texto. Se numerarán las ecuaciones a las que se haga referencia en el mismo, mediante un número entre paréntesis, situado a la derecha de la ecuación. La referencia en el texto se hará del mismo modo: ejemplo, ecuación (5). Se evitarán en lo posible las listas de símbolos; el significado de cada uno se indicará inmediatamente a continuación de la primera vez que aparezca en el texto.
TABLAS	Las tablas se numerarán consecutivamente, y de manera independiente a las figuras. En la parte superior, centrado, se situará el título. Se evitará que las tablas contengan datos que se encuentren recogidos en otra parte del artículo, por ejemplo un diagrama. Las tablas se insertarán en el texto, en lugar próximo a donde se citan. En el texto se hará referencia a las tablas mediante Tabla 1, Tabla 2, etc.
FIGURAS	Las figuras se limitarán a las estrictamente imprescindibles, y deberán tener la suficiente calidad para permitir la reproducción directa, en blanco y negro. Se insertarán en el texto y habrán de tener el tamaño aproximado con el que aparecerían en la publicación definitiva. Se procurará que la figura en sí contenga el mínimo texto posible, pudiendo incluirse toda la información que se desee en el pie de figura. No se admitirán figuras sin título. En el texto se hará referencia a las figuras mediante Fig. 1, Fig. 2, etc.
REFERENCIAS	Las referencias bibliográficas se citarán en el texto mediante el número encerrado entre corchetes: [1], [1,7], [2-6], etc. Al final se incluirá, en el apartado correspondiente, un listado de todas ellas, numeradas por orden de aparición en el texto. No se admitirán referencias que no se citen en el texto. A continuación se muestran algunos ejemplos: 1. Stokes, A.N., Welsh, M.C., "Flow-Resonant Sound Iteration in a Duct Containing a Plate", <i>Journal of Sound and Vibration</i> 104, 55-73 (1986) 2. Morse, P.M., Ingard, K.U., <i>Theoretical Acoustics</i>, McGraw-Hill, New York (1968) 3. Blanco, P., "Modelo de Cálculo Resistente de Transmisiones por Tornillo Sinfin", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (1994) 4. Lee, Y., Itho K., Horne, R.M., "Structure of Multi-Cellular Natural Convection in a Tall Vertical Annulus", <i>Proceedings, 7th International Heat Transfer Conference</i> 2, 127-130, Washington, D.C. (1989) 5. AGMA Standard 2001-B88, "Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gears", American Gear Manufacturers Association, Alexandria (1988) 6. Worraker, W.J., "Grazing Flow Effects on the Impedance of Cavity Liners", <i>Institute of Sound and Vibration Research, Memorandum No. 114</i>, Ann Arbor (1995)
COPIAS	Los autores recibirán de forma gratuita 10 copias de su artículo. Opcionalmente podrá solicitar, mediante formulario que se enviará con las pruebas de imprenta, copias adicionales y ejemplares del número de la revista en el que aparezca su publicación, a precio reducido.



INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO DA FERRAMENTA DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 304 E AISI 316

AMANDA DE OLIVEIRA MICHELON¹, FERNANDO MICHELON MARQUES²,
ALEXANDRE DA SILVA ROCHA³, KELI VANESSA SALVADOR DAMIN^{2,4}

¹Universidade do Extremo Sul Catarinense

Av. Universitária, 1105 - Universitário, Criciúma - SC, 88806-000, Brasil

²Instituto Federal de Santa Catarina

Avenida Nereu Ramos, 3450 D - Seminário, Chapecó - SC, 89813-000, Brasil

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Paulo Gama, 110 - Farroupilha, Porto Alegre - RS, 90040-060, Brasil

(Recibido 29 de abril de 2020, para publicación 7 de marzo de 2022)

Resumo – Este trabalho teve como objetivo investigar a influência do parâmetro de avanço da ferramenta de usinagem na resistência à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos. Para esse fim, reproduziu-se o processo de torneamento dos aços AISI 304 e AISI 316 empregando dois avanços diferentes. Posteriormente, as superfícies torneadas foram submetidas à análise de rugosidade e a ensaio de corrosão por polarização linear. Concluiu-se que a rugosidade é diretamente proporcional ao parâmetro de avanço e que as superfícies mais irregulares, por apresentarem maior área de interface metal/meio, apresentam taxas de corrosão maiores do que aquelas com menores valores de rugosidade.

Palavras-chave – Aços inoxidáveis austeníticos, corrosão, parâmetros de corte, polarização.

1. INTRODUÇÃO

Os conceitos popularmente difundidos consideram a corrosão um fenômeno exclusivo dos materiais metálicos. Apesar da estreita relação com os metais, essas concepções mostram-se bastante limitadas, uma vez que processos corrosivos também ocorrem em materiais cerâmicos, poliméricos e compósitos. Nesse contexto, atualmente, procura-se conceituar a corrosão de maneira mais ampla.

De uma forma universalmente aceita, GENTIL [1] define corrosão como “a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”. Essa deterioração provocada pela interação físico-química entre o material e o meio ao qual ele é submetido inclui modificações microestruturais, variações químicas e desgaste, frequentemente, prejudiciais à durabilidade e desempenho do material e, portanto, indesejáveis [1].

Sendo um processo destrutivo, a corrosão representa um grande problema para praticamente todos os setores da atividade humana. Diversos países, desenvolvidos ou não, tem estudado o problema da corrosão por uma ótica econômica. Os prejuízos estimados chegam a resultados da ordem de 1 a 5% do PIB. Na indústria siderúrgica, um quinto da produção mundial de aço é destinado a repor perdas causadas pela corrosão [2]. Além do impacto na economia, verificam-se perdas humanas irreparáveis provocadas por contaminações, poluição e falta de segurança pela falha de componentes em serviço [3].

A descoberta dos aços inoxidáveis, por meio de estudos realizados em 1911 nos Estados Unidos e em 1912 na Inglaterra e Alemanha, representou um grande avanço em direção ao desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão. Os números de produção evidenciam o impacto que estes materiais representaram. Em 1934, foram produzidas 56 mil toneladas; em 1953, mais de 1 milhão de toneladas; em 1996, aproximadamente 10 milhões de toneladas [4]. Dados divulgados pelo Fórum Internacional de Aço Inox (ISSF:

International Stainless Steel Forum) relatam uma produção mundial de aproximadamente 41,5 milhões de toneladas de aços inoxidáveis em 2015, o que representa um crescimento de mais de 30% em cinco anos. De toda essa produção, cerca de 65 a 70% são austeníticos, fazendo deste o maior grupo de aços inoxidáveis em uso [5].

A expressão “aço inoxidável” transmite a ideia de um material que não se deteriora mesmo quando utilizado em meios agressivos. Entretanto, embora esse material apresente uma maior resistência à corrosão nessas condições, quando comparado aos aços carbono, essa resistência é limitada, por exemplo, em meios ricos em cloro [6]. Assim, o campo dos aços inoxidáveis ainda oferece a possibilidade de melhoramentos e desenvolvimentos de novas ligas, com base em conhecimentos científicos e exigências atuais [7].

Os aços inoxidáveis constituem um grupo de suma importância do ponto de vista tecnológico, tendo em vista que, devido às suas excelentes propriedades químicas como alta resistência à corrosão e resistência a temperaturas elevadas, eles são aplicados nas mais variadas áreas de produção industrial, principalmente em equipamentos de processo [4] [7].

Uma parcela significativa desses materiais é empregada no setor de usinagem, tendo em vista que mais da metade dos produtos fabricados em aço inoxidável são submetidos a algum tipo de operação de usinagem antes de chegarem a sua forma final [8]. Contudo, são materiais de difícil usinabilidade, principalmente os do tipo austeníticos. Os aços de usinabilidade melhorada podem ser uma alternativa, porém, algumas vezes, não possuem o mesmo campo de aplicação [7].

Quanto a relação entre resistência a corrosão e usinagem, o que ocorre é a mudança de microestrutura de austenita para algumas porcentagens de martensita, doravante denominadas como martensita induzido por deformação (TRIP), desta maneira diminuindo a resistência à corrosão por parte dos aços inoxidáveis austeníticos. Esta mudança pode ser explicada pelos esforços de remoção de material, originados pela combinação entre avanço de ferramenta e velocidade de corte. Contudo o avanço da ferramenta é o maior influenciador desta mudança de morfologia, haja visto que quanto maior o avanço da ferramenta, maiores são os esforços de corte durante o processo de torneamento [13].

Na indústria carbonífera os prejuízos provocados pela corrosão são expressivos. Eixos de bombas centrífugas empregados em mineradoras sofrem processo corrosivo, devido ao ambiente extremamente agressivo aos aços carbono convencionais. A utilização de aços inoxidáveis é uma alternativa relativamente eficaz para atenuar esses inconvenientes [9].

Tais componentes são produzidos por usinagem, processo largamente empregado na fabricação de componentes de máquinas. Assim, torna-se importante o estudo dos efeitos desse processo na resistência à corrosão e, conseqüentemente, na resistência mecânica desses componentes. Estudos anteriores [4] [8] [9] identificaram forte influência da variação da velocidade de avanço nessas propriedades.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais selecionados para este estudo correspondem a dois aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316, fornecidos por Favorit Aços Especiais, no estado solubilizado, na forma de barras redondas laminadas e trefiladas. As composições químicas de ambos os aços foram obtidas por espectroscopia de emissão óptica e são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Composições químicas médias (%) dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 utilizados.

AISI	C (máx.)	Si (máx.)	Mn (máx.)	Cr	Mo	Ni	P (máx.)	S (máx.)	Outros (máx.)
304	0,08	0,75	2,00	19,00	-	9,00	0,045	0,030	N-0,10
316	0,08	0,75	2,00	17,00	2,50	12,00	0,045	0,030	N-0,10

A metodologia utilizada neste projeto consistiu, basicamente, na produção de corpos de prova por torneamento, análise da rugosidade das superfícies torneadas e ensaio de corrosão por meio da técnica eletroquímica de polarização linear.

A usinagem dos corpos de prova foi realizada por meio de torno convencional Nardini® modelo Nodus ND-250, utilizando suporte intercambiável com inserto de metalduro Iscar® modelo TNMG 332-TF IC 907

revestido com TiAlN+TiN, sem fluido de corte. Quanto ao inserto o mesmo possui raio de ponta da ferramenta de 0,8 mm, que ao ser montado no suporte, proporcionou um ângulo de folga de 6°, com ângulo de saída do cavaco de 12°, bem como o ângulo de posição da aresta de corte de 90°.

Para análise do efeito do parâmetro de avanço, cada material foi submetido a torneamento sob dois avanços diferentes (f_n) – 0,1 mm/rot e 0,3 mm/rot – totalizando quatro corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 20 mm e comprimento de 50 mm cada. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de velocidade de corte (v_c) e profundidade de corte (a_p) utilizados no torneamento de cada corpo de prova.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados.

Material	v_c (m/min)	f_n (mm/rot)	a_p (mm)	Corpo de prova
AISI 304	63,0	0,1	1,0	304/F0,1
	63,0	0,3	1,0	304/F0,3
AISI 316	63,0	0,1	1,0	316/F0,1
	63,0	0,3	1,0	316/F0,3

As medições de rugosidade da superfície torneada de cada corpo de prova foram realizadas por meio de rugosímetro Mitutoyo® modelo SJ-310. Foram obtidos resultados de rugosidade média (R_a) conforme a norma ISO 4287:1997.

Para a realização dos ensaios de corrosão, uma célula eletroquímica constituída de três eletrodos (eletrodo de referência, contra eletrodo e eletrodo de trabalho) foi construída em um béquer com capacidade de 250 ml. A Fig. 1 mostra a célula montada, utilizando um eletrodo de calomelano saturado como eletrodo de referência (a), uma malha de platina como contraeletrodo (b) e o corpo de prova a ser analisado como eletrodo de trabalho (c). Ainda foi utilizada uma solução em meio salino constituída de cloreto de sódio, NaCl, a 3,5% em peso em 250 ml de água destilada.

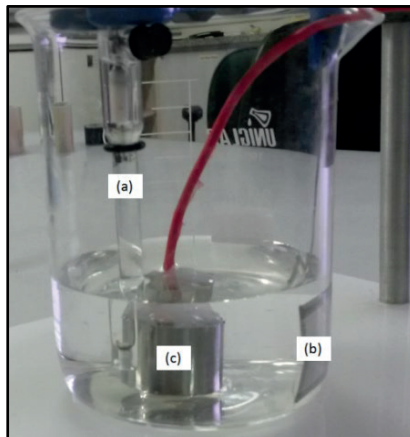


Fig. 1. Célula eletroquímica construída para a realização dos ensaios de corrosão.

Para cada corpo de prova empregado como eletrodo de trabalho, foi calculada a área de superfície exposta. Todos os potenciais foram referenciados em relação ao eletrodo de calomelano saturado.

Por meio de um potenciostato/galvanostato da marca Bio-Logic Science Instruments® modelo SP 200 foram realizadas as medidas de polarização linear e a leitura e análise dos resultados foi realizada com auxílio do software EC-Lab V10.23. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na técnica de polarização linear.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na polarização linear.

Parâmetro (Unidade)	304/F0,1	304/F0,3	316/F0,1	316/F0,3
Área de superfície do eletrodo de trabalho (cm ²)	9,4908	12,5463	10,2070	10,9208
Eletrodo de referência: calomelano saturado (V)	0,241	0,241	0,241	0,241
Peso equivalente [aço] (g/eq.)	27,925	27,925	27,925	27,925
Densidade [aço] (g/cm ³)	7,850	7,850	7,850	7,850
E _{inicial} (V)	-0,390299	-0,521783	-0,351738	-0,487761
E _{final} (V)	-0,245846	-0,122329	-0,177292	-0,0325332
Velocidade da variação de potencial [dE/dt] (mV/s)	5	5	5	5
Tempo (s)	500	500	500	500

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais anunciados anteriormente. As Fig. 2, 3, 4 e 5 trazem as curvas adquiridas nos testes de polarização linear das amostras 304/F0,1, 304/F0,3, 316/F0,1 e 316/F0,3, respectivamente.

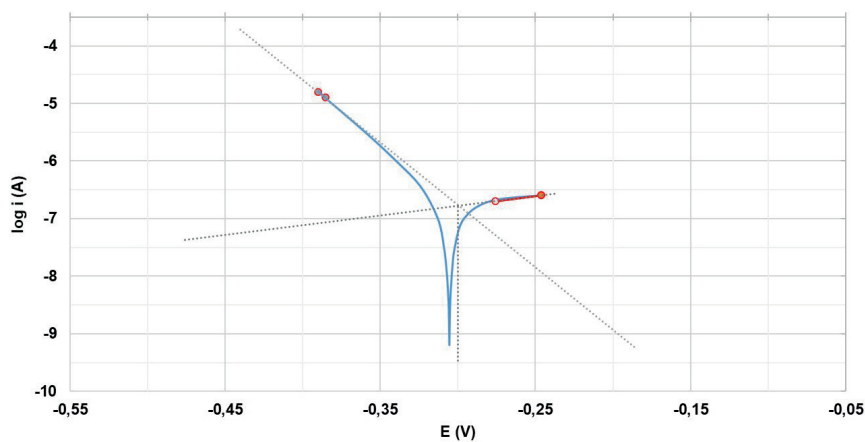


Fig. 2. Curva de polarização do aço AISI 304/ F0,1.

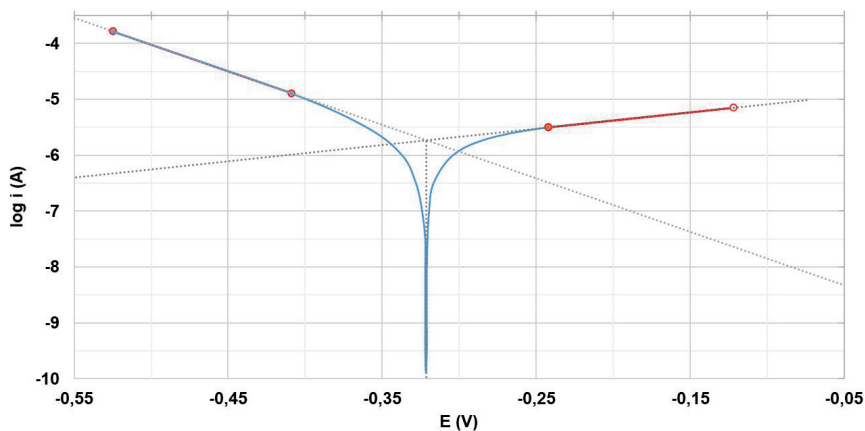


Fig. 3. Curva de polarização do aço AISI 304/ F0,3.

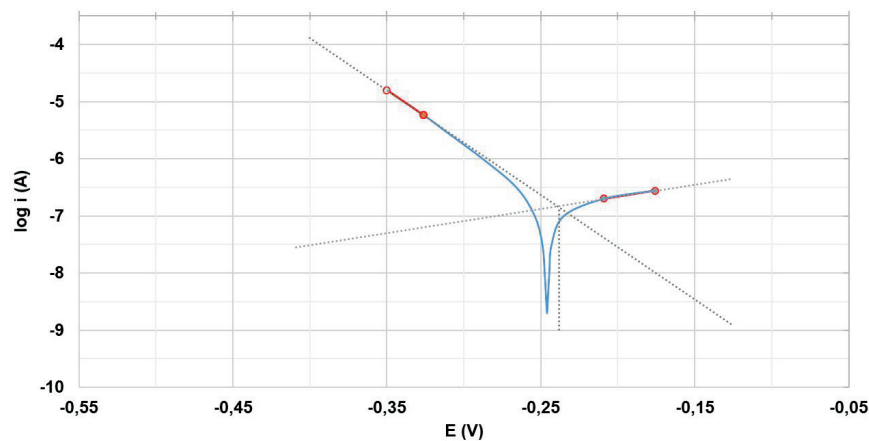


Fig. 4. Curva de polarização do aço AISI 316/ F0,1.

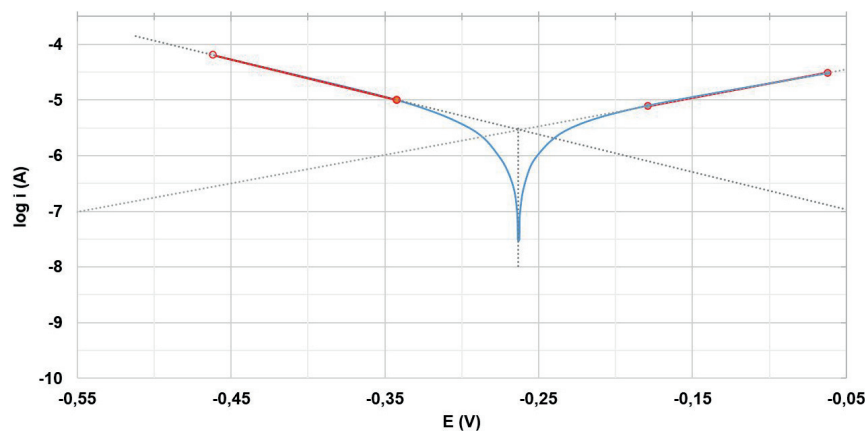


Fig. 5. Curva de polarização do aço AISI 316/ F0,3.

Tabela 4. Resultados de rugosidade, potencial, corrente e taxa de corrosão obtidos experimentalmente.

Corpo de prova	Ra (μm)	Ecor (V vs. REF.)	Icor (μA)	Taxa de corrosão ($\times 10^{-3}$ mm/ano)
304/F0,1	1,162	-0,306385	0,244	0,299
304/F0,3	6,073	-0,321571	2,089	2,291
316/F0,1	1,435	-0,246095	0,289	0,329
316/F0,3	5,954	-0,263191	3,079	3,955

A Tabela 4 apresenta os valores de rugosidade média (Ra), potencial de corrosão (Ecor), corrente de corrosão (Icor) e taxa de corrosão obtidos experimentalmente para cada corpo de prova.

Observa-se que todas as curvas obtidas apresentaram aspecto de curva de polarização por ativação, em ambas as regiões, anódica e catódica. Os valores de Ecor ditam o potencial necessário para ativar o processo de corrosão, já os valores de Icor ditam a velocidade de corrosão. Quanto mais positivo o valor de Ecor mais nobre é o material e quanto menor o Icor menor é a velocidade de corrosão. A taxa de corrosão está ligada principalmente ao valor Icor sendo por isso que os menores valores de taxa de corrosão foram encontrados para as amostras que obtiveram menores valores de Icor.

Analisando os dados referentes aos corpos de prova constituídos de aço inoxidável AISI 304, pode-se observar que, o corpo de prova usinado com menor avanço (304/F0,1), 0,1 mm/rot, apresentou rugosidade $Ra = 1,162 \mu\text{m}$. Usinando este mesmo material com maior avanço, 0,3 mm/rot, como realizado no corpo

de prova 304/F0,3, foi obtida uma superfície mais irregular, com rugosidade $R_a = 6,073 \mu\text{m}$. Com o aço inoxidável AISI 316, esse comportamento se repete. Comparando os corpos de prova 316/F0,1, usinado com 0,1 mm/rot de avanço, e 316/F0,3, usinado com 0,3 mm de avanço, a rugosidade aumentou de 1,435 μm para 5,954 μm .

Esses resultados confirmam uma tendência já observada por [12] [13]: considerando um mesmo material usinado nas mesmas condições (raio de curvatura da ponta da ferramenta, velocidade e profundidade de corte), um aumento no parâmetro de avanço da ferramenta de usinagem produz uma superfície com maior rugosidade.

Ainda comparando os dados referentes aos corpos de prova constituídos de aço AISI 304, pode-se observar que aquele com maior rugosidade (304/F0,3), obtido a partir do torneamento com maior parâmetro de avanço, 0,3 mm/rot, apresentou uma taxa de corrosão mais acentuada, $2,291 \times 10^{-3}$ mm/ano. Da mesma forma, comparando os corpos de prova constituídos de aço AISI 316, aqueles com superfície mais irregular (316/F0,3), também obtidos a partir do torneamento com maior parâmetro de avanço, apresentaram uma maior taxa de corrosão, $3,955 \times 10^{-3}$ mm/ano.

Tais resultados condizem com a teoria descrita por [9] [14] acerca da influência da rugosidade na resistência à corrosão de superfícies usinadas. Superfícies com rugosidades mais protuberantes apresentam maiores quantidades de picos e vales, aumentando a área de contato da superfície com o meio, favorecendo um maior acúmulo de impurezas (neste caso, impurezas originadas da mistura água + NaCl) nessa interface, acelerando o processo de corrosão [9] [10].

O aumento na taxa de corrosão dos corpos de prova usinados com maior avanço pode ser atribuído também ao fato de o aço inoxidável perder suas características de resistência à corrosão à medida que sofre deformação plástica, pois a sua estrutura cristalina passa de austenítica para martensítica [9].

Já comparando os corpos de prova 304/F0,1 e 316/F0,1, usinados nas mesmas condições (0,1 mm/rot de avanço), pode-se observar que o último, constituído de aço AISI 316, apresentou rugosidade superficial um pouco maior. Tal fato pode ser explicado pela presença de aproximadamente 2,5% de molibdênio no aço que prejudica a usinabilidade do material, reduzindo o acabamento superficial da peça usinada [11].

4. CONCLUSÕES

O processo de corrosão, como ocorre na interface metal/eletrolito, está intimamente ligado às condições superficiais do metal. Assim, as condições de corte, por interferirem nas propriedades superficiais, também influenciam na resistência à corrosão.

De acordo com os resultados obtidos, o aumento de 0,1 para 0,3 mm/rot de avanço, tanto na usinagem do aço inoxidável AISI 304 quanto do aço inoxidável AISI 316, provocou aumentos significativos na rugosidade das superfícies usinadas. Conclui-se, então, que o parâmetro de avanço é diretamente proporcional à rugosidade, ou seja, um aumento no avanço da ferramenta durante o processo de usinagem produz uma superfície mais irregular.

As superfícies mais irregulares, por apresentarem maior área de interface metal/meio, apresentaram taxas de corrosão maiores do que aquelas com menores valores de rugosidade. Assim, conclui-se que, submetidas às mesmas condições, as superfícies mais rugosas apresentam maior susceptibilidade à corrosão do que aquelas com menores rugosidades.

REFERÊNCIAS

- [1] Gentil, V., *Corrosão*, 3 ed., Rio de Janeiro, LTC (1996)
- [2] Duperron, M., “Os danos da corrosão na economia” http://www.diariodocomercio.com.br/noticia.php?tit=os_danos_da_corrosao_na_economia_&id=101214. Acessado em: março de 2016.
- [3] Merçon, F., Guimarães, P.I., Mainier, F.B., “Corrosão: Um Exemplo Usual de Fenômeno Químico”, *Química Nova na Escola*, 19, 11-14 (2004)
- [4] Gomes, J.O., Weingaertner, W.L., “Análise da Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico SAE 304 com Variação dos Parâmetros Metalúrgicos”, *Máquinas e Metais* 1, 57-68 (1996)

- [5] Camargo, R., “Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação”, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2008)
- [6] Sousa, L., “Avaliação dos efeitos dos parâmetros de usinagem e dos tratamentos térmicos no torneamento de três aços inoxidáveis austeníticos”. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2006)
- [7] Sousa e Silva, F.C., “Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 a partir do estudo da formação do cavaco”. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia (2007)
- [8] Barbosa, P.A. Machado, I.F., “Strain Rate Effect on the Mechanical Behavior of Austenitic Stainless Steel during Machining”, *Advanced Materials Research*, 223, 332-339 (2011)
- [9] Souza, C.A.B., “Análise da Resistência ao Desgaste e a Corrosão do Aço AISI 304 Utilizados em Mineradoras de Carvão”. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade SATC, Criciúma (2015)
- [10] Amorim, H.J., Mombru, R.G., Ribeiro, J.L.D., Kunrath Neto, A.O., “Estudo da relação entre desgaste de flanco, rugosidade e forças de corte em torneamento com ferramenta de metal duro”. *Máquinas e Metais*, Brasil, 440, 70-81 (2002)
- [11] Padinha, A.F., Guedes, L.C., “Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades” São Paulo, Hemus (1994)
- [12] Ferraresi, D., *Fundamentos da usinagem dos metais*, São Paulo, Edgard Blucher LTDA (1970)
- [13] Suyama, D.I., “Efeito do fresamento com alta velocidade de corte na integridade superficial de aços ferríticos com grãos ultrafinos” Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira (2010)
- [14] Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., *Tecnologia da usinagem dos materiais*, São Paulo, MM editora (1999)

INFLUENCE OF THE FEED RATE ON THE CORROSION RESISTANCE OF STAINLESS STEEL AISI 304 AND 316

Abstract – The aim of this work was to investigate the influence of the machining tool 's feed parameter on the corrosion resistance of austenitic stainless steels. The AISI 304 and AISI 316 steels were machined using two different feed. Subsequently, the turned surfaces were subjected to roughness analysis and linear polarization corrosion testing. It was concluded that the advance parameter is directly proportional to roughness and that the more irregular surfaces, due to the greater area of metal/environment interface, present higher corrosion rates than those with lower roughness values.

Keywords – Austenitic Stainless Steels, Corrosion, Cutting Parameters, Polarization.



COMPORTAMIENTO DE LA ATRACCIÓN ENTRE UN LÍQUIDO FERROMAGNÉTICO Y UN CAMPO MAGNÉTICO DEPENDIENDO DE LA TEMPERATURA DEL LÍQUIDO

CELINE ROJAS SCHRÖTER, RODRIGO PONCE DÍAZ

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico
64849 Monterrey, N.L. México

(Recibido 13 de agosto de 2020, para publicación 7 de marzo de 2022)

Resumen – Se realizó un análisis experimental con el objetivo de identificar si existe un cambio en la atracción magnética entre un líquido ferromagnético y un campo magnético estable, dependiendo de la temperatura del líquido. El líquido ferromagnético analizado se sintetizó como una suspensión coloidal de partículas ferromagnéticas de ferrita de hierro Fe_3O_4 (II, III) (98%) en aceite de motor (Castrol Magnatec 20W-50) como líquido portador. Este experimento se llevó a cabo analizando 15 temperaturas para el fluido, dentro de un intervalo entre -11°C y 90°C . Los resultados de esta investigación muestran un efecto directo entre la fuerza de atracción del fluido y la inducción magnética debido al cambio de temperatura del líquido. Identificamos una tendencia decreciente de la fuerza de atracción al aumentar la temperatura del líquido que puede ser descrito con tres patrones de comportamiento: el primero entre -11°C a 24°C , el segundo entre 24°C a 35°C y el tercero entre 35°C a 90°C . En base a los resultados analizados, esta investigación expone la posibilidad de explicar este comportamiento como consecuencia de que la saturación magnética no sea únicamente una constante del material, sino dependa también de la temperatura del mismo.

Palabras clave – Líquido ferromagnético, atracción magnética, cambio de temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

La idea de un combustible magnético para ser manipulado bajo gravedad cero dentro de un cohete de la NASA, es la primera aparición del líquido ferromagnético [1], un concepto que introdujo el término ferrohidrodinámica por primera vez en una publicación científica en 1963 por Neuringer y Rosensweig [2]. Este fluido magnético despertó investigaciones hasta 1999, año en el que se reportaron 178 artículos científicos con relación al nuevo nanofluido¹ [3]. Aun cuando la propuesta inicial no se llevó a cabo, 20 toneladas anuales de este líquido son producidas para diversas aplicaciones por la compañía que patentó esta tecnología: Ferrotec Corporation [1, 3].

Entre las aplicaciones del líquido ferromagnético, se encuentran: separación de materiales [1, 3], sellos dinámicos, dispositivos acústicos, impresoras [1, 6] y por sus propiedades para disipar calor se utiliza en la generación de energía nuclear, ventanas de doble panel, enfriamiento y calentamiento de edificios, colectores solares, enfriamiento electrónico [4-6] e incluso en aplicaciones médicas para atacar células cancerígenas [5, 6].

Debido a la falta de información que exponga explícitamente la relación entre las propiedades magnéticas y rangos de temperatura del líquido y las numerosas aplicaciones de este fluido, surge la siguiente pregunta de investigación como objetivo del presente trabajo, determinar si existe una relación entre las propiedades magnéticas del líquido y un cambio en su temperatura.

¹ Anexo.1: Gráfica del número de publicaciones sobre los líquidos ferromagnéticos entre 1968 y 2001 [3].

1.1. Principios del magnetismo

La teoría moderna del magnetismo acepta que el magnetismo “es una propiedad de la carga en movimiento” [7], resultado del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo del átomo [7]. Estas partículas con masa y carga eléctrica crean un dipolo magnético² llamado magnetón o imán molecular [8]. Los imanes moleculares se concentran en grupos llamados dominios, donde los ejes magnéticos de los átomos, al apuntar en la misma dirección, crean momentos magnéticos. Estas agrupaciones alineadas generan un polo norte y un polo sur, lo que se conoce como campo magnético [7-9]. Dependiendo del tamaño de los dominios y su nivel de ordenamiento se puede clasificar su nivel de magnetismo. Esta medida de magnetismo se conoce como la permeabilidad, “capacidad de un medio para establecer líneas de flujo magnético” [7]. Al comparar la permeabilidad de un material contra la correspondiente al vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Tm A^{-1}$), es posible clasificar a los materiales magnéticos, razón conocida como permeabilidad relativa [7]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1)$$

Tres tipos de materiales pueden ser clasificados a partir de esta razón:

- Diamagnéticos: μ_r ligeramente menor a μ_0
- Paramagnéticos: μ_r ligeramente mayor a μ_0
- Ferromagnéticos: μ_r cientos hasta miles de veces mayor a μ_0 [7]

Son estos últimos los que conocemos como materiales magnéticos, compuestos por al menos uno de los siguientes materiales o sus aleaciones: hierro, níquel y cobalto.

1.2. Líquido ferromagnético

La ciencia que estudia la deformación de sustancias debido a fuerzas externas es conocida como reología [10]. Dentro de esta rama podemos identificar la descripción del flujo magnético denominado ferrohidrodinámica, como la mecánica del movimiento de fluidos influenciados por una fuerza magnética [3,11,12]. Después de consultar diferentes fuentes, se puede definir a un líquido ferromagnético como: una suspensión coloidal de partículas ferromagnéticas suspendidas en un líquido portador [2, 4, 5, 6, 10, 13, 14, 15]. Las fuerzas que describen el comportamiento de un líquido ferromagnético son [3, 12, 13]:

1. Magnetismo:

$$E_M = \mu_0 MBV \quad (2)$$

2. Gravedad

$$E_G = \Delta\rho VgL \quad (3)$$

3. Fuerza Intermolecular

- Capilaridad
- Energía térmica

$$E_T = kT \quad (4)$$

donde M es la saturación magnética³, B fuerza del campo magnético, $V = \pi d^3(6m)^{-3}$ volumen de una partícula esférica de diámetro d , $\Delta\rho$ diferencia de densidad al líquido portador, $g = 9.81ms^{-1}$ fuerza gravitacional de la tierra, L elevación en el campo gravitacional, $k = 1.38 \times 10^{-23} NmK^{-1}$ constante de Boltzmann⁴, T temperatura en Kelvin [3,12].

Un líquido ferromagnético se comporta como cualquier fluido en la ausencia de un campo magnético fuerte, pero si la fuerza del peso (2.gravedad) y la influencia de la tensión superficial (3.capilaridad) son compensadas por un campo magnético externo (1.magnetismo), entonces los dipolos magnéticos de las

² Polos opuestos y de igual magnitud [9].

³ Máxima magnetización alcanzada por un material [3].

⁴ Relación entre la energía y la temperatura absoluta [24].

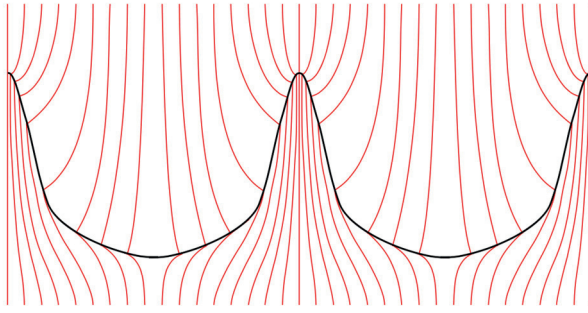


Fig. 1. Estructura que genera un líquido ferromagnético bajo la influencia de un campo magnético [13].

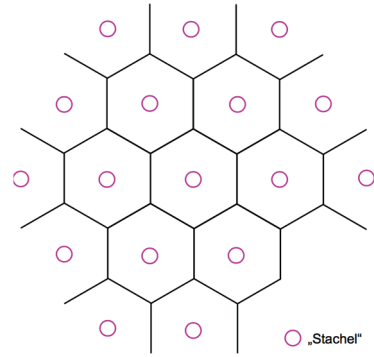


Fig. 2. Representación del patrón hexagonal que forma el líquido ferromagnético al interactuar con una fuerza magnética, donde los círculos representan las “espigas” [13].

partículas ferromagnéticas del líquido se alinearán con el campo magnético. Visualmente el fluido formará “espigas” separadas por “valles” [3, 13].

Las líneas de flujo del campo magnético externo se concentran en las “espigas”; estas aumentan en número mientras la distancia entre ellas se reduce al aumentar la fuerza magnética inducida. A esta inestabilidad de la superficie se le conoce como Inestabilidad de Rosensweig [13, 16].

En cuanto a las propiedades del líquido en relación con la temperatura podemos tomar en cuenta únicamente cuatro puntos:

1. Como cualquier fluido, este es afectado por el movimiento Browniano: movimiento dinámico de las nanopartículas en un líquido [17], que previene la aglomeración de las mismas [12].
2. Se ha investigado sobre el movimiento Browniano para predecir la conductividad termal de nanofluidos [17], tomando en cuenta que dentro de las amplias aplicaciones que tienen los líquidos ferromagnéticos [1-6] se ha mencionado una gran propiedad para conducir calor denominada termomagnetización [4-6].
3. Por encima de la temperatura de Curie⁵ T_C , el líquido no puede ser magnetizado [5].
4. La única relación que pude encontrar entre la energía termal y magnética es la siguiente:

$$\frac{\text{Energía termal}}{\text{Energía magnética}} = \frac{kT}{\mu_0 MBV} \geq 1 \quad (5)$$

indicando que la energía térmica debe ser mayor a la magnética para una desmagnetización [12].

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El objetivo de esta investigación es la medición del comportamiento de la fuerza de atracción entre un líquido ferromagnético y un campo magnético, para lo que se utilizaron las siguientes herramientas de medición:

1. Termopar (Fluke 52II) con un error de lectura de $\pm 0.1^\circ\text{C}$, para medir la temperatura del líquido (V_I).
2. Dinamómetro digital (PASCO PS-2104 con interface PASPORT), con un error de lectura de ± 0.10 N para medir la fuerza de atracción (V_D).

Esto significa que lo primero que se abordó para poder contestar a nuestra pregunta de investigación fue la elaboración de ambos componentes.

⁵ Temperatura a la cual un material pierde su magnetismo [23].

2.1. Síntesis del líquido ferromagnético

Lo primero que se intentó, fue sintetizar magnetita a partir de una neutralización. Se prepararon las soluciones: 2M FeCl₂ 1M FeCl₃ y 0.5M NH₄OH. Mezclando FeCl₂ en 1 ml de agua y FeCl₃ en 4 ml de agua y agregando 1.93 ml de Hidróxido de Amonio (25%)⁶ en 50 ml de agua por goteo a lo largo de 5 min, se obtuvo la magnetita como un precipitado negro. Se decantó la magnetita con la ayuda de un imán y se agregó 1 ml de Hidróxido de Tetrametilamonio (25%), que funcionó como un surfactante para la solución [18]. Esta mostró propiedades magnéticas en la presencia de un campo magnético, pero no presentó Inestabilidad de Rosensweig. Por lo tanto, se optó por una suspensión coloidal de Fe₃O₄(II, III) (98%), suspendida en un aceite de motor (Castrol Magnatec 20W-50) portador. Los resultados fueron positivos ya que al estar suspendidas las partículas de hierro en aceite no sufrían la tensión superficial del agua que el surfactante Hidróxido de Tetrametilamonio ocasionaba, al tener una concentración del 25% disuelto en agua. La suspensión coloidal sintetizada presentó Inestabilidad de Rosensweig.⁷ Se utilizó el mismo líquido ferromagnético durante toda la experimentación, ya que existe una relación entre el tamaño de las partículas y la inducción magnética [12]. Esta experimentación se llevó a cabo en el laboratorio TEMP⁸ de la Universidad de California, San Diego, EUA (UCSD), durante el programa ENLACE en el verano 2018.

2.2. Solenoide de níquel

El líquido ferromagnético sintetizado se colocó en un frasco de vidrio con el dinamómetro digital (dónde se desprecia la fuerza del peso de la masa del frasco y líquido de 4.50 g) sobre el polo sur del campo magnético generado por un solenoide, midiendo así la fuerza de atracción entre ambos componentes.

Un solenoide es un alambre enrollado en forma helicoidal o de espiras que al conectarlo con una corriente eléctrica se comporta de la misma manera que un imán de barra, generando líneas de flujo magnético entre un polo norte y sur [7, 19]. Se utilizó un solenoide para generar el campo magnético, ya que este se puede incrementar con:

- El número de espiras, al contribuir cada una con la intensidad magnética [7, 19].
- Incluir un núcleo ferromagnético en el interior del solenoide puede aumentar mil veces más la fuerza magnética [19].
- Además, su fuerza magnética se puede calcular con [7, 19]:

$$\vec{B} = \frac{\mu NI}{L} \quad (6)$$

donde $\vec{B}$ representa la inducción magnética, μ la permeabilidad del núcleo, I la corriente en amperes y L la longitud del solenoide en metros.

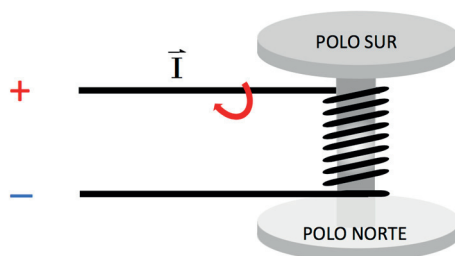


Fig. 3. Se determina el polo sur del solenoide por la dirección de la corriente.

⁶ Se agregó 1.95ml de Hidróxido de Amonio y no 1.5ml, ya que se trabajó con una concentración del 25% y no del 29% como en la investigación consultada.

⁷ Anexo.2: Evidencia de la solución sintetizada.

⁸ Thermal Energy Materials and Physics.

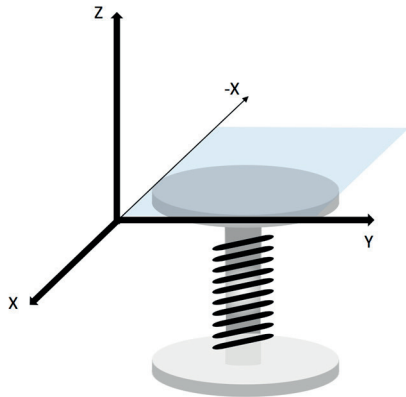


Fig. 4. Dirección del flujo magnético en el polo sur del solenoide.

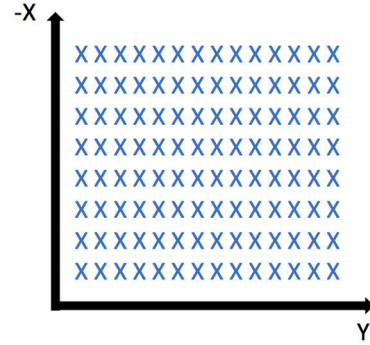


Fig. 5. Eje sobre el cual el fluido interactúa con el campo magnético generado por el solenoide.

- A Líquido Ferromagnético
- B Solenoide
- C Dinamómetro
- D Termopar
- E Fuente de Energía
- F Soporte universal
- G Computadora (para el registro de datos del dinamómetro)

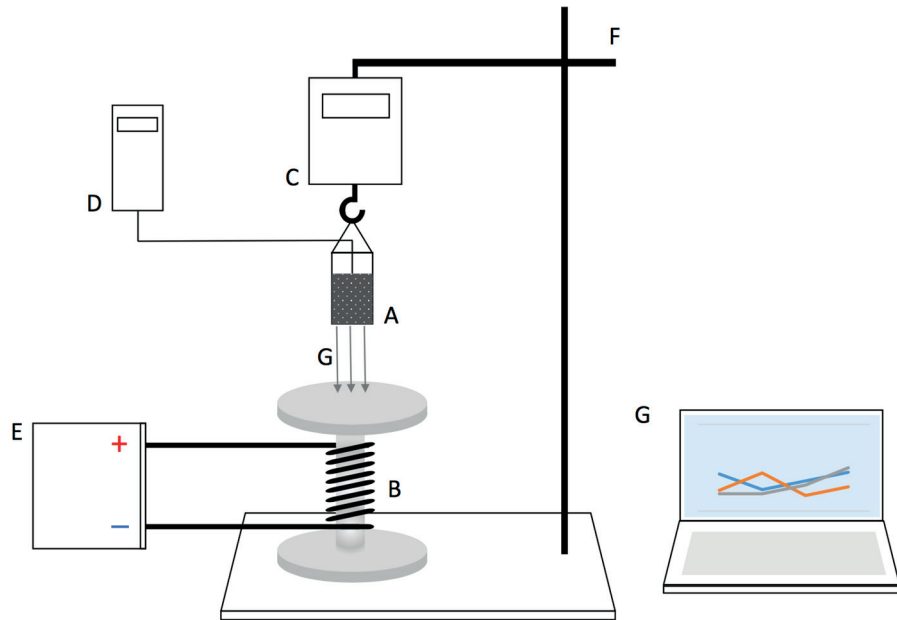


Fig. 6. Representación gráfica del diseño experimental.

Se utilizó un solenoide con 845 espiras de cobre con una resistividad teórica de $1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ [20] y una barra de níquel (99.5%) con una longitud de 0.097 m. Se utilizó níquel ya que es un material ferromagnético y tiene una permeabilidad relativa de $600 \mu_r$ [21].

La temperatura del líquido se registró durante todo el experimento con el termopar. Se realizaron tres intentos para las siguientes 15 temperaturas: -11°C , -0°C , 24°C , 30°C , 35°C , 40°C , 45°C , 50°C , 60°C , 65°C , 70°C , 75°C , 80°C , 85°C y 90°C , durante las cuales el dinamómetro registró la fuerza de atracción en Newtons cada 0.05 s (para minimizar el cambio de temperatura en el registro de datos durante cada intento) durante un periodo de 7.00 s.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para identificar un comportamiento entre los -11°C y 90°C se calculó un promedio para los valores de fuerza de atracción registrados entre los 4.00 s y 7.00 s por temperatura en la Tabla.1, incluyendo el error aleatorio. En esta tabla se puede ver una disminución de la fuerza de atracción con respecto al aumento de la temperatura del fluido. La temperatura más baja, de -11.0°C , presenta una fuerza de atracción de 4.80 N, mientras que la temperatura más alta, de 90.0°C , presenta una fuerza de atracción de 2.56 N.

El decremento de fuerza parece ser constante con respecto al incremento de temperatura: únicamente los registros de fuerza correspondientes a las temperaturas -5.0°C , 45.0°C y 85°C muestran un incremento de fuerza respecto a la temperatura anterior. Entre los -5.0°C y 45.0°C existe un incremento de 0.02 N y 0.03 N con un error aleatorio igualmente mayor al de la temperatura anterior, lo que se pudiera deber a un error en la experimentación del ± 0.1 N, mismo valor del error de lectura que presenta la herramienta de medición, por lo que se puede considerar entre el rango despreciable. De igual forma, la fuerza correspondiente a los 85°C presenta la misma variación menor al 0.1 N de fuerza con respecto a la temperatura anterior.

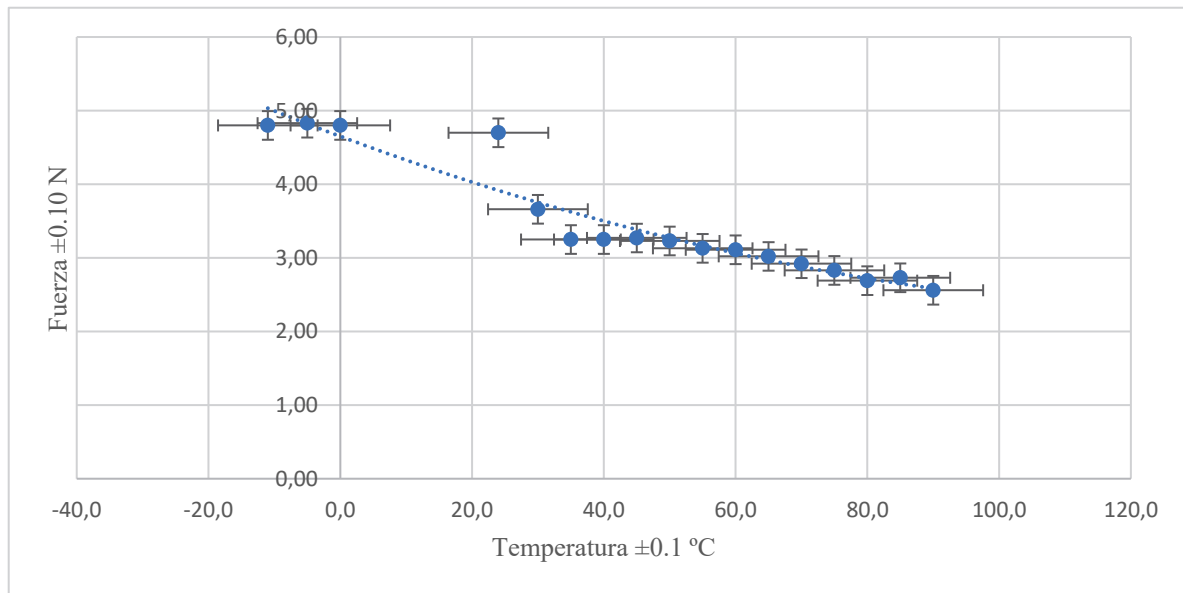
Tabla 1. Promedio de la fuerza de atracción magnética en Newtons ± 0.10 N, error aleatorio y porcentual por temperatura $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

Temperatura $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	Fuerza ± 0.01 N	Error aleatorio	Error Porcentual %
-11.0	4.80	0.02	0.370
-5.0	4.83	0.06	1.25
0.0	4.80	0.04	0.820
24.0	4.70	0.2	4.26
30.0	3.66	0.03	0.820
35.0	3.25	0.03	1.03
40.0	3.25	0.02	0.710
45.0	3.27	0.03	1.01
50.0	3.23	0.04	1.15
55.0	3.13	0.03	0.850
60.0	3.11	0.02	0.640
65.0	3.02	0.03	0.950
70.0	2.92	0.02	0.850
75.0	2.83	0.03	1.01
80.0	2.69	0.02	0.700
85.0	2.73	0.02	0.740
90.0	2.56	0.03	1.16

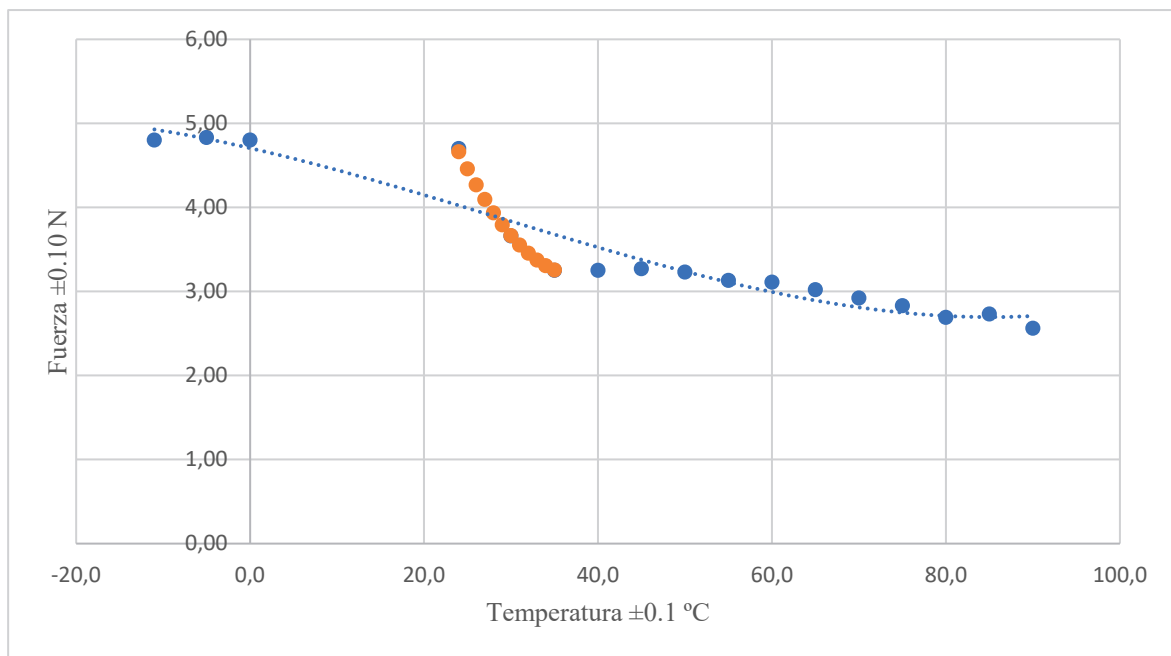
Si revisamos los errores aleatorios presentes en esta misma tabla, podemos ver que todos se encuentran por debajo del 0.1%, a excepción del valor correspondiente a los 40°C de 0.2%, siendo este porcentualmente menor al 5% con un valor del 4.26%, que pudiera deberse a un error en la experimentación. Todos los demás errores se encuentran alrededor del 1%.

En la Gráfica 1 podemos apreciar mejor la relación entre la temperatura del fluido y la fuerza de atracción con el campo magnético. Podemos observar el comportamiento decreciente analizado previamente, pero este no es constante, sin embargo, puede ser seccionado en tres intervalos como se representa en la Gráfica 2.

En la Gráfica 3 observamos que entre los 24.0°C y los 35.0°C se presenta un mayor decremento de la fuerza de atracción, con una línea de tendencia polinómica de segundo grado que se ajusta a la ecuación $F = 0.0083T^2 - 0.6217T + 14.838$ casi perfectamente con un $R^2 = 1$.

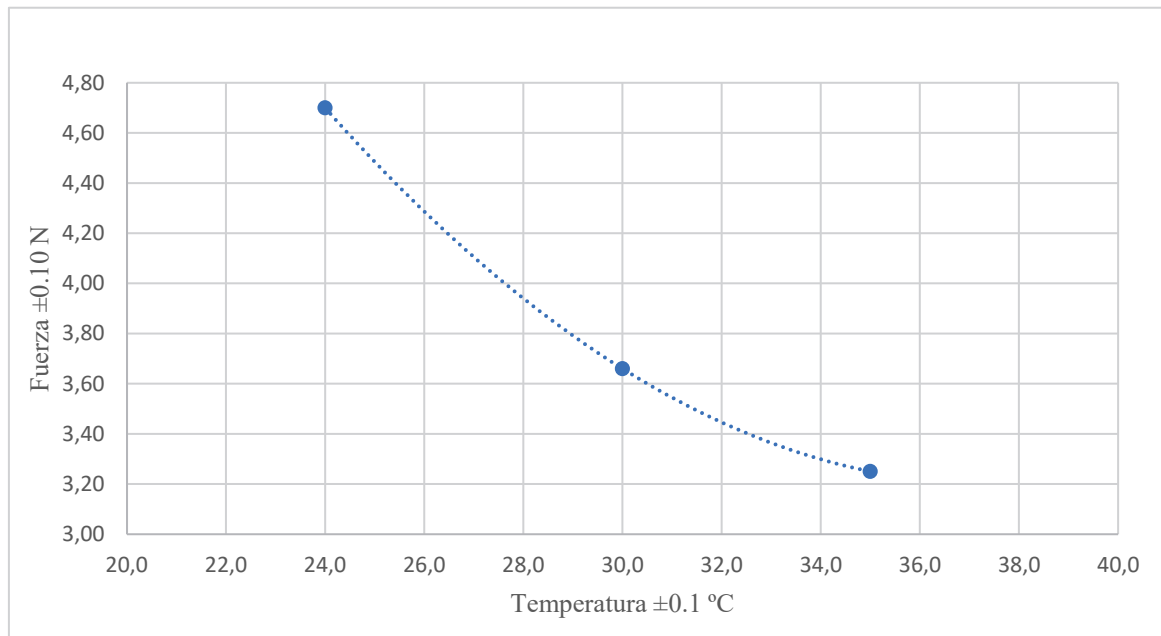


Gráfica 1. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético por temperatura del líquido ferromagnético. Datos graficados de la Tabla.3 con una ecuación para la línea de tendencia de $F = 0.0001T^2 - 0.0334T + 4.651$ y una $R^2 = 0.9092$.

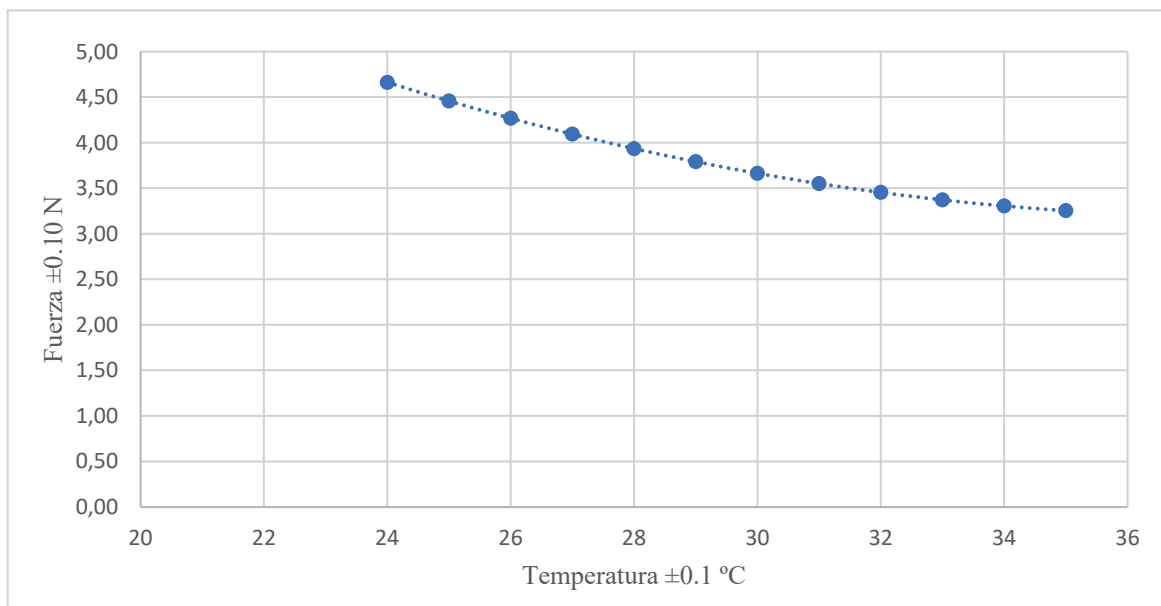


Gráfica 2. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético entre -11°C y 90°C . Donde en naranja se muestran las temperaturas entre 24°C y 35°C calculadas a partir de la ecuación de la línea de tendencia $F = 0.0077T^2 - 0.5823T + 14.202$ con una $R^2 = 1$ y en azul las temperaturas registradas en la Gráfica.1.

Calculando a partir de la ecuación de esta gráfica los posibles valores entre 20°C y 35°C con un intervalo de 1°C y representando este resultado en la Gráfica 4, podemos ver una curva cóncava hacia arriba. Misma curva que podemos observar en la Gráfica 2 en color naranja, por encima de los datos calculados en la Tabla 3, para identificar el posible comportamiento de la fuerza en este intervalo.



Gráfica 3. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre 24°C y 35°C; con una ecuación para la línea de tendencia de $F = 0.0083T^2 - 0.6217T + 14.838$ y una $R^2 = 1$.



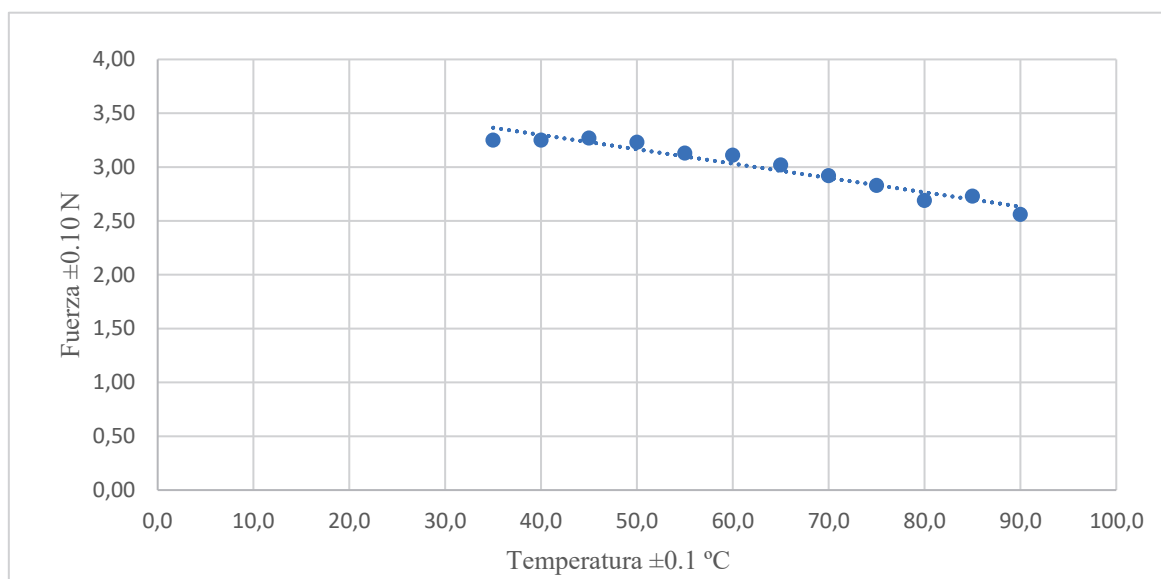
Gráfica 4. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre 24°C y 35°C calculadas a partir de la ecuación de la línea de tendencia $F = 0.0077T^2 - 0.5823T + 14.202$ con una $R^2 = 1$.

Si calculamos la razón a la cual pierde energía la fuerza de atracción entre los 24°C y 35°C, en la Tabla 2, vemos que lo hace con una razón de -0.136 N por 1°C, valor mayor a la cual se pierde fuerza entre los 35°C y 90°C, de -0.092 por 5°C.

De manera general podemos observar cómo el comportamiento de la fuerza contra la temperatura se secciona en tres intervalos: de -11°C a 24°C, de 24°C a 35°C y de 35°C a 90°C. El intervalo de 24°C a 35°C

Tabla 2. Fuerza ± 0.001 N calculada por grado Centígrado, entre los 24°C y los 35°C a partir de la ecuación de la línea de tendencia presente en la Gráfica 7. Fuerza promedio perdida por grado Celsius ± 0.001 N°C⁻¹ en este intervalo de temperatura.

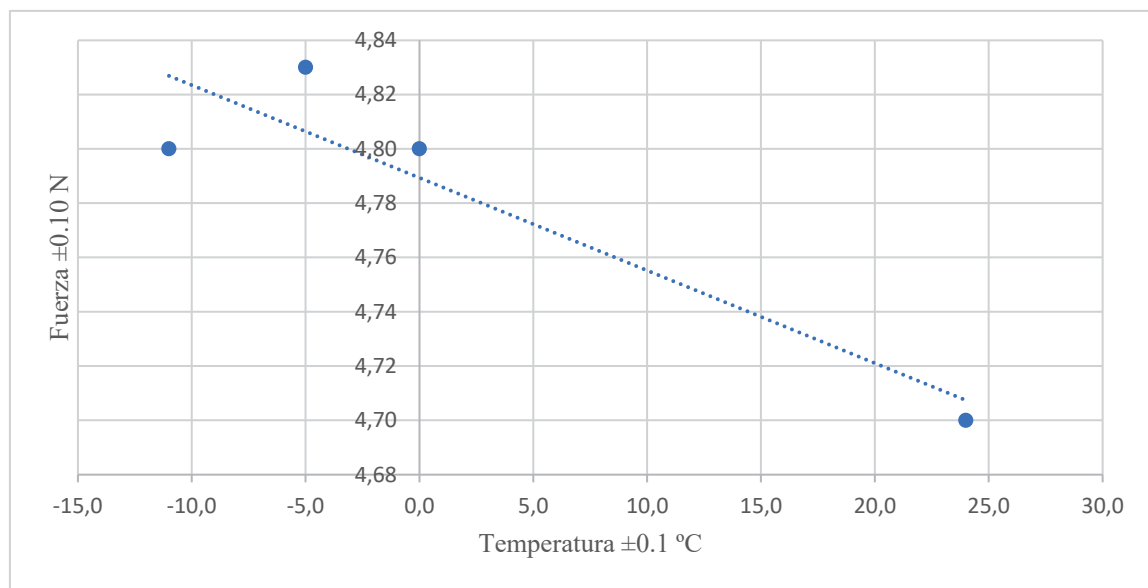
Temperatura ± 0.1 °C	Fuerza ± 0.001 N	Fuerza perdida por grado Celsius ± 0.001 N°C ⁻¹
24.0	4.662	
25.0	4.457	-0.205
26.0	4.267	-0.190
27.0	4.093	-0.174
28.0	3.934	-0.159
29.0	3.791	-0.143
30.0	3.663	-0.128
31.0	3.550	-0.113
32.0	3.453	-0.097
33.0	3.371	-0.082
34.0	3.305	-0.066
35.0	3.254	-0.051
Promedio de la fuerza perdida por grado Celsius ± 0.001 N°C⁻¹		-0.136



Gráfica 5. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre 35°C y 90°C; con una ecuación de la línea de tendencia $F = -0.0133T + 3.8318$ y una $R^2 = 0.93563$.

fue presentado anteriormente con el mayor decremento de fuerza, mientras que, en el tercer intervalo, de 35°C a 90°C, se presentan la mayor parte de los datos registrados.

Por últimos, el primer intervalo, de -11°C a 24°C, encontramos el menor decremento de fuerza, en el que una línea de tendencia con una ecuación lineal de $F = -0.0034T + 4.7893$ no se ajusta a los datos, presentando una $R^2=0.85$, menor al tercer y primer intervalo, conectando únicamente 4 puntos.



Gráfica 6. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre -11°C y 24°C ; con una ecuación de la línea de tendencia $F = -0.0034T + 4.7893$ y una $R^2 = 0.85031$.

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo podemos demostrar que la temperatura del líquido ferromagnético sintetizado ejerce un efecto directo entre la fuerza de atracción del fluido y la inducción magnética generada por un solenoide: La fuerza de atracción entre un líquido ferromagnético y un campo magnético **disminuirá al incrementar** la temperatura del líquido y, viceversa, aumentará al decrecer la temperatura del líquido.

De forma general, el análisis muestra un comportamiento decreciente de la fuerza de atracción entre el fluido y el campo magnético, contra el aumento de temperatura del líquido. Más a detalle se observan 3 patrones de comportamiento, que podemos clasificar por intervalos de temperatura de la siguiente manera:

- En el primer intervalo de -11°C a 24°C se describe el **menor decremento** de fuerza de atracción con respecto a la temperatura, del -0.0034 NC^{-1} , a la que se ajusta una ecuación lineal de: $F = -0.0034T + 4.7893$.
- En el segundo intervalo de 24°C a 35°C se encuentra el **mayor decremento** de la fuerza de atracción con respecto a la temperatura, del -0.136 NC^{-1} , a la que se ajusta una ecuación polinómica de segundo grado de: $F = 0.0083T^2 - 0.6217T + 14.838$.
- En el tercer intervalo de 35°C a 90°C se ubica la **mayor parte de los resultados** con un decremento de -0.092 NC^{-1} , a la que se ajusta una ecuación lineal de $F = -0.0133T + 3.8318$.

Podemos ordenar los intervalos de comportamiento de la fuerza de atracción con respecto a la temperatura de menor a mayor, de la siguiente forma:

$$1\text{er intervalo} < 3\text{er intervalo} < 2\text{do intervalo}$$

Regresando a nuestro marco teórico, las fuerzas que interactúan con el líquido ferromagnético son: la fuerza magnética, gravitacional e intermolecular. Siendo la influencia magnética la que se estudia en este trabajo, consultamos la ecuación 2 referente a la energía por partícula que ejerce la misma:

$$E_M = \mu_0 MBV$$

Lo primero que debemos tomar en cuenta, es que la ecuación 2 no relaciona la temperatura con la energía magnética. Mientras μ_0 y B , representan valores que afectan al líquido ferromagnético y por lo tanto son independientes de sus propiedades, V y M hacen referencia a las características del material. El volumen por partícula V no toma en cuenta la energía térmica por partícula, ya que sus dimensiones no se alteran con un cambio de temperatura, únicamente la distancia y velocidad con la que se mueven entre ellas como lo menciona el movimiento Browniano. Al no tomarse en cuenta las partículas del fluido como un conjunto, V no incluye la temperatura a la que se exponen, mientras que la saturación magnética M si toma en cuenta al material como un conjunto y la máxima magnetización que este puede alcanzar como una constante por material, pero sin relacionar a la temperatura del mismo. Al existir un comportamiento entre la temperatura del fluido y su fuerza de atracción magnética, como lo demostró el experimento de este trabajo, y siendo μ_0 , B y V valores a los que no se puede relacionar la temperatura del material, esta investigación expone la posibilidad de que la saturación magnética M no sea una constante del material, pero dependa de la temperatura del mismo.

Una posible explicación para el comportamiento analizado pudiera ser el colectivo canónico, donde la suma de las energías individuales en la cinética por partícula es en conjunto una fuerza que contrarresta al magnetismo [22].

En cuanto a las limitaciones, este trabajo considera las siguientes:

- Se analizó únicamente el comportamiento del fluido entre los -11°C y 90°C , ya que no fue posible incrementar o disminuir en mayores rangos la temperatura del líquido ferromagnético.
- No era posible mantener la temperatura del líquido constante por periodos mayores a los 10.00 s para analizar el comportamiento del líquido en menores intervalos de temperatura, por lo que se midió la fuerza de atracción cada 0.05 s entre los 4.00 s y los 7.00 s, para intervalos de 5°C entre los -11°C y 90°C .

En cuanto a las recomendaciones propuestas para desarrollar estudios relacionados con esta investigación, se pudiera analizar:

- El comportamiento del líquido en rangos menores a los -11°C e intervalos más pequeños para obtener un perfil más extenso y preciso entre la fuerza de atracción y la temperatura del fluido.
- Experimentar con diferentes líquidos ferromagnéticos, variando el tamaño de las partículas o el líquido portador.
- Un perfil en cuanto a la densidad del líquido para las experimentaciones propuestas.

REFERENCIAS

- [1] Ferrotec Corporation, About Us | Ferrofluid. Retrieved from <https://ferrofluid.ferrotec.com/about-us/> (2019)
- [2] Venkatasubramanian, S., Kaloni, P., "Stability and Uniqueness of Magnetic Fluid Motions", *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **458**(2021), 1189-1204. Retrieved from <http://0-www.jstor.org.millennium.itesm.mx/stable/3067261> (2002)
- [3] Lange, A., Instabilitäten magnetischer Flüssigkeiten in statischen Magnetfeldern. *Fakultät Für naturwissenschaftlicher Otto-Von-Guericke-Universität Magdeburg*, 1-9 (2003)
- [4] Kefayati, G., "Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM", *Journal Of Molecular Liquids*, **191**, 1-9. doi: 10.1016/j.molliq.2013.11.021 (2014)
- [5] Muhammad, N., Nadeem, S., Mustafa, M., "Analysis of ferrite nanoparticles in the flow of ferromagnetic nanofluid". *PLOS ONE*, **13**(1), 1-3. doi: 10.1371/journal.pone.0188460 (2018)
- [6] Mahajan, S., Mahajan, A., "A nonlinear stability analysis for magnetized ferrofluid heated from below". *Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, **464**(2089), 83-84. doi: 10.1098/rspa.2007.1906 (2008)
- [7] Tippens, P. (2011). Física, Conceptos y aplicaciones (7th ed.). Perú: El Comercio S.A
- [8] Mody, V., Singh, A., Wesley, B., "Basics of magnetic nanoparticles for their application in the field of magnetic fluid hyperthermia". *European Journal of Nanomedicine*, **5**(1), 11. doi: 10.1515/ejnm-2012-0008 (2013)
- [9] Pople, S., Lloyd, S., *Complete physics for Cambridge IGCSE*

- [10] Cuprich Rodríguez, M., Elizondo Garza, F., “Amortiguadores magnetoreológicos”. *Departamento De Dinámica, FIME-UANL*, **1**(2), 50 (1998).
- [11] Rosensweig, R., “Magnetic Fluids”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **19**(1), 437-461. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002253 (1987)
- [12] Rosensweig, R., *Ferrohydrodynamics* Mineola, New York: Dover Publications, Inc. (2014)
- [13] Reckerth, A., Ehmann, A., Nanotechnik Ferrofluide. *Institut Dr. Flad*, 1-13 (2015)
- [14] Majeed, A., Zeeshan, A., Ellahi, R., “Unsteady ferromagnetic liquid flow and heat transfer analysis over a stretching sheet with the effect of dipole and prescribed heat flux”. *Journal Of Molecular Liquids*, **223**, 528-529. doi: 10.1016/j.molliq.2016.07.145 (2016)
- [15] Szczech, M., Horak, W., Numerical Simulation and Experimental Validation of the Critical Pressure Value in Ferromagnetic Fluid Seals. *IEEE Transactions On Magnetics*, **53**(7), 1. doi: 10.1109/tmag.2017.2672922 (2017)
- [16] Sebastian, R., Nanotechnologie im Schulunterricht am Beispiel Rastertunnelmikroskop und Ferrofluid. *Julius-Maximilians-Universität Würzburg*, 87-100. Retrieved from <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Nanotechnologie.pdf> (2011)
- [17] Sohel Murshed, S., Nieto de Castro, C., *Contribution of Brownian Motion in Thermal Conductivity of Nanofluids* London, U.K.: World Congress on Engineering (2011)
- [18] Chun, D., Karlen, S., Kolodziej, C., Jost, B., Virji, S., Weinberger, M., „Synthesis of an Aqueous Ferrofluid”, *The California Nanosystems Institute & Materials Creation Training Program University Of California, Los Angeles Science Outreach Program*, (3), 1-12. Retrieved from <http://voh.chem.ucla.edu/outreach.php3> (2005)
- [19] Serway, R., Jewett Jr, J., *Física para ciencias e ingenierías* Vol. 1. 7e. Mexico, México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V. (2008)
- [20] David R. Lide CRC Press Inc, ed. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (en inglés) (90 edición). (2009)
- [21] Brown, W.F., *Magnetic Materials*, Ch 8 in the Handbook of Chemistry and Physics, Condon and Odishaw, eds., McGraw-Hill (1958)
- [22] Prausnitz, J. M., *Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria*, 3rd. Edition / John M. Prausnitz, Rüdiger N. Lichtenthaler, Edmundo Gomes de Azevedo, New Jersey : Upper Saddle River, N. J.: Prentice-Hall (1997) eng, 0139777458
- [23] Zeeshan, A., Majeed, A., Fetecau, C., Muhammad, S., “Effects on heat transfer of multiphase magnetic fluid due to circular magnetic field over a stretching surface with heat source/sink and thermal radiation”. *Results In Physics*, **7**, 3353-3356. doi: 10.1016/j.rinp.2017.08.047 (2017)
- [24] Çengel, Y.A., *Heat and Mass Transfer: a practical approach* (Tercera edición) McGraw Hill (2007)
- [25] Colin Cameron, A., Windmeijer, F., “An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models”. *Journal Of Econometrics*, **77**(2), 329-342. doi: 10.1016/s0304-4076(96)01818-0 (1997)

ANEXOS

Anexo 1:

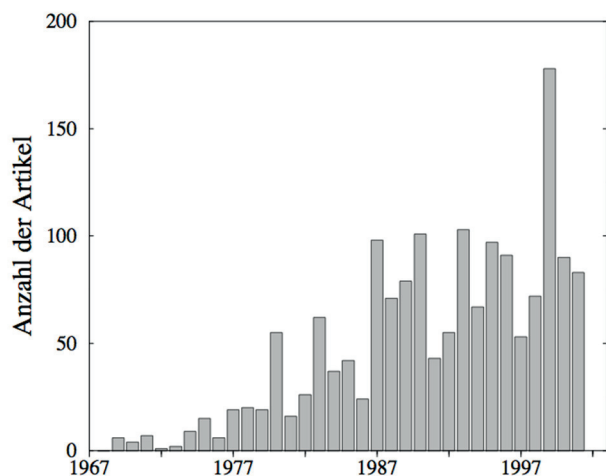


Fig. 8. Número de publicaciones sobre los líquidos ferromagnéticos entre 1968 y 2001 [3].

Anexo 2:



Fig. 9. La suspensión coloidal sintetizada presentó inestabilidad de Rosensweig.

ATTRACTIVE BEHAVIOR BETWEEN A FERROMAGNETIC LIQUID AND A MAGNETIC FIELD DEPENDING ON THE TEMPERATURE OF THE LIQUID

Abstract—Experimental analysis was performed to identify if there is a change in the magnetic attraction between a ferromagnetic liquid and a stable magnetic field, depending on the temperature of the liquid. The analyzed ferromagnetic fluid was synthesized as a colloidal suspension of ferromagnetic iron ferrite particles Fe_3O_4 (II, III) (98%) in engine oil (Castrol Magnatec 20W-50) as a carrier fluid. In this experiment, the ferrofluid was analyzed at 15 different temperatures, within an interval between -11°C and 90°C . The results of the present investigation show a direct effect between the attraction force of the fluid and the magnetic induction due to the temperature change of the liquid. A decreasing tendency of the attraction force was identified as the temperature of the liquid increased, which can be described within three patterns of behavior: the first one between -11°C and 24°C , the second one between 24°C and 35°C , and the third one between 35°C and 90°C . Based on the analyzed results, this article exposes the possibility of explaining this behavior as a consequence that the magnetic saturation is not only a constant of the material but also dependent on its temperature.

Keywords—Ferromagnetic Liquid, Magnetic Attraction, Change in Temperature.



ANÁLISIS TERMOMECAÁNICO DE UN REACTOR MEDIANTE EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS Y SU VERIFICACIÓN A PARTIR DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

CLAUDIO GABRIEL CANGELOSI, HECTOR CLAUDIO SANZI

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Haedo
Paris 537, Haedo, Buenos Aires, Argentina

(Recibido 4 de octubre de 2019, revisado 13 de enero de 2020, para publicación 24 de febrero de 2021)

Resumen – Las plantas industriales de alta capacidad tecnológica, tales como petroquímicas, refinerías, químicas, alimenticias, metalúrgicas, nucleares, entre otras, poseen componentes contenedores de presión, cañerías y equipos operando en condiciones extremas. En la actualidad, la tecnología alcanzada en el diseño de dichas plantas, permiten operar con sus equipos a elevadas presiones y temperaturas o en situaciones desfavorables en cuanto a la degradación (principalmente la corrosión) de los materiales, pero siempre manteniendo los límites de seguridad y control requeridos por sus operadores. La seguridad y el perjuicio económico que significaría la posible falla de un equipo instalado en la planta, en particular el caso de los reactores, diseñados para operar en altas presiones y temperaturas, requieren de un exhaustivo y apropiado análisis que asegure su integridad estructural a lo largo de su vida útil. En los últimos años, han surgido nuevas especificaciones destinadas a la adecuada selección de los materiales y a cumplir con requerimientos de análisis más exigentes, los cuales se incorporan en el diseño, la fabricación y la inspección. Un reactor de origen nuclear de baja potencia para uso en investigación científica o para abastecimiento energético en regiones aisladas, es tomado como base del presente trabajo, cuyo diseño se encuadra entre las denominadas “Centrales Modulares de Última Generación”. Para el análisis, se determinó la distribución térmica sobre el cuerpo del reactor a través del planteo de las ecuaciones diferenciales de Transferencia de Calor, resueltas por el Método de las Diferencias Finitas donde se determinó la distribución térmica y el estado tensional asociado y donde los resultados se presentan en forma adimensional, de sencilla resolución y de uso práctico. Para corroborar los resultados obtenidos, se planteó un modelo tridimensional por elementos finitos.

Palabras clave – Convección natural, tensiones de origen térmico, elementos finitos.

1. INTRODUCCION

Las plantas industriales de alta capacidad tecnológica, tales como petroquímicas, refinerías, químicas, alimenticias, metalúrgicas, nucleares, entre otras, poseen componentes contenedores de presión operando en condiciones extremas de presión y/o temperatura o en situaciones desfavorables en cuanto a la degradación (principalmente la corrosión) de los materiales, pero siempre manteniendo los límites de seguridad y control requeridos por sus operadores.

Para esta situación es requerido un exhaustivo y apropiado análisis que, junto con los requerimientos y especificaciones incorporados en los códigos de aplicación destinados a seleccionar adecuadamente los materiales y cumplir con las pautas para el diseño y fabricación, aseguren la integridad del componente a lo largo de su vida útil.

El problema de transferencia de calor por conducción y convección entre un fluido y la pared interna de un recipiente a presión ha sido estudiado y tratado ampliamente, existiendo suficiente literatura del caso.

En este trabajo se presenta una metodología de análisis a partir del planteo de las ecuaciones diferenciales de Transferencia de Calor por conducción y convección resueltas por el Método de Diferencias Finitas, para determinar la distribución térmica y el estado tensional asociado, para la condición operativa normal

y sobre las paredes cilíndricas de un recipiente contenedor de presión, válido para aquellas zonas del recipiente lo suficientemente alejadas de transiciones o cambios bruscos o ahusamientos del espesor.

El componente a presión, sobre el cual se realizó el presente estudio, se trata de un reactor nuclear de baja potencia, encuadrado entre las denominadas “Centrales Modulares de Última Generación”.

Los resultados de la distribución de temperatura y tensiones desarrolladas sobre dicho componente se presentan expresados en gráficos y tablas mediante una formulación general adimensional de rápida y de práctica aplicabilidad.

Para corroborar los resultados obtenidos, se plantea un modelo tridimensional por elementos finitos, utilizando el programa Ansys [1].

El estudio se lleva a cabo bajo los lineamientos del Código ASME Sección III División 1, Sub-Sección NB “Quality Class” Clase 1 [2].

Si bien el procedimiento propuesto trata de un componente cuyo proceso está relacionado con su uso en la industria nuclear, el alcance y conceptos generales son aplicables para un reactor de características similares, utilizado en la industria convencional.

1.1. Descripción general y operativo del reactor para uso en investigación (RPR)

El presente estudio se lleva a cabo para un reactor de investigaciones utilizado en la industria nuclear, y diseñado con el objeto de analizar su factibilidad, en cuanto a su construcción, manejo y uso, bajo los lineamientos del Código ASME Sección III División 1, Sub-Sección NB “Quality Class” Clase 1 [2].

La principal diferencia del reactor nuclear del instalado en una planta convencional es que se trata de un componente integrado, es decir, tanto el circuito Primario (núcleo, generadores de vapor y refrigerante primario), incluyendo los mecanismos de control, como el Secundario, se encuentran contenidos en el mismo Recipiente de Presión del Reactor (RPR).

El refrigerante primario circula por el interior del RPR, debido a un fenómeno de convección natural, evitando de esta manera el uso de bombas. El fluido primario es “Agua Liviana”, comúnmente conocido como agua destilada, que incorpora un tratamiento anti-desincrustante. Esta característica hace que los reactores de Agua Liviana sean más simples y menos costosos.

Al no utilizar bombas para la circulación del fluido, se evita el uso de generadores eléctricos de emergencia que deban proveer energía para el funcionamiento en operación, o para los sistemas de control asociados a la seguridad, como es habitual en los reactores tradicionales.

La Fig. 1, muestra una representación simplificada y un corte de un Reactor Nuclear típico (RPR) utilizado en investigaciones.

El equipo consiste en 12 (doce) Generadores de Vapor, ubicados de forma radial y perpendicular al eje axial del recipiente y en la parte superior de este. Cada Generador está constituido por 6 (seis) camisas

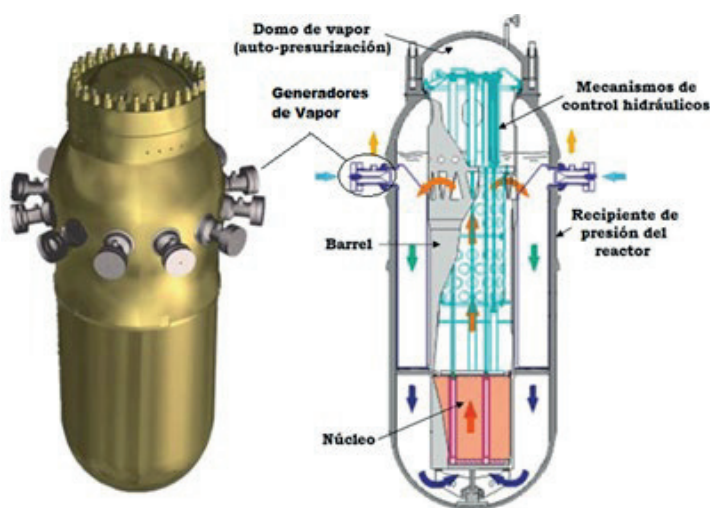


Fig. 1. Recipiente de presión del reactor nuclear.

tubulares, actuando, así como intercambiador de calor entre los circuitos Primario y Secundario, donde en el Primario el fluido gana temperatura en el interior del reactor y cede su calor al fluido del circuito Secundario, para que lo transforme en energía mecánica y luego eléctrica.

El fluido del circuito Primario toma energía térmica, circulando por convección natural, entre los espacios del núcleo central con elementos combustibles de uranio levemente enriquecido y posteriormente asciende por el centro del recipiente hacia la parte superior donde se encuentran los Generadores de Vapor, cediendo calor y así enfriado, retorna por las paredes al centro del reactor para repetir el ciclo.

Este movimiento se realiza por convección natural, es decir por la diferencia de densidades en un mismo fluido debido a un campo de temperaturas variable, en razón de espacio, y todo sometido a la acción de un campo gravitatorio. Este tipo de movimiento hace prescindir de cualquier medio mecánico externo (bombas), lo cual le confiere confiabilidad al proceso.

La transferencia de calor entre el fluido primario y secundario se realiza en dos pasos:

- Precalentamiento del condensado (secundario), proveniente de las turbinas, el cual toma temperatura en serpentines ubicados en la zona exterior inferior y media, del recipiente a presión (RPR), Fig. 2.
- Cambio de fase del fluido secundario, de líquido a gaseoso producido en los intercambiadores de calor denominados Generadores de Vapor.

En todo el proceso de transferencia de calor, se utiliza el cambio de fase del fluido primario de vapor a líquido, de manera de optimizar este proceso de intercambio. Por lo que se supone que el fluido primario está en fase de vapor cuando egresa de los generadores de vapor y comienza a condensarse a la altura inferior de los serpentines de calentamiento.

Para el análisis y para el fluido primario, se toman valores de temperatura y presión suponiéndolo totalmente en fase de vapor, ya que se corresponde con un caso operativo del Reactor. Esta hipótesis permite economizar considerablemente el esfuerzo analítico y computacional para el cálculo de tensiones y deformaciones.

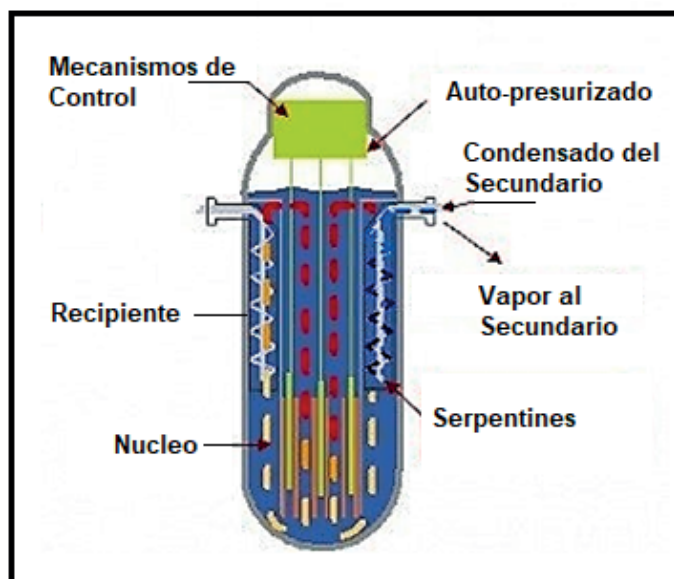


Fig. 2. Ubicación de los Serpentines dentro del recipiente de presión del reactor nuclear.

1.2. Geometría de detalle y datos generales del Reactor

El estudio se realiza en dos secciones cilíndricas del RPR que presentan diferentes espesores, en zonas alejadas de interferencias y transiciones. En la Fig. 3, se presenta un corte transversal y detalle dimensional general del reactor.

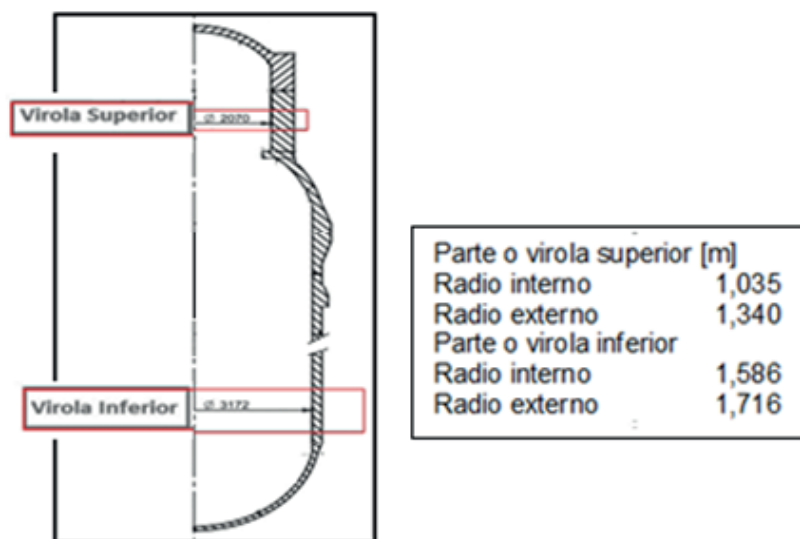


Fig. 3. Geometría de detalle del Reactor.

El material constituyente del recipiente es un ASME SA508 Gr.3 C1.1 [3]. Para la temperatura media de operación de 183 °C, se tiene los siguientes coeficientes [4] y [5]:

Conductividad térmica, k	40,53 W/m°C
Calor específico, c	491,7 J/kg°C
Densidad, ρ	7750 kg/m ³
Módulo de Elasticidad, E	182,3 GPa
Coefficiente de dilatación térmica, α	$1,27 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coefficiente de Poisson, ν	0.3

El presente trabajo, propone un análisis a partir de la distribución de temperatura que se desarrollan en el cuerpo cilíndrico del reactor en su condición operativa, con el objeto de obtener las máximas tensiones térmicas, que aseguren su integridad, sobre la base del código de aplicación.

Bajo condiciones operativas normales, el reactor está sometido a un intercambio de calor entre la fase líquida y de vapor del fluido, y a altas presiones.

Para el análisis se asumen válidos los siguientes conceptos:

- El proceso se estudia en zonas alejadas de transiciones o cambios bruscos del espesor del reactor.
- La distribución de temperaturas se mantiene lineal a través del espesor, una situación muy aproximada a la real. Esta hipótesis permite economizar considerablemente el esfuerzo analítico y computacional para el cálculo de tensiones y deformaciones.

Dicha simplificación considera al recipiente parcialmente lleno de vapor y en contacto directo sobre las paredes de las virolas del recipiente. Este vapor fluye en el interior con caudales y temperaturas que fluctúan de acuerdo a las demandas operativas del conjunto.

2. TRATAMIENTO DIFERENCIAL DEL PROBLEMA

2.1. Análisis de Transferencia de Calor

De acuerdo a la geometría del componente y características del proceso, solo se presenta conducción de flujo calórico y variación de temperatura en sentido radial y uniforme en sentido axial.

La fórmula diferencial de partida para la determinación de la distribución de temperaturas y el estado tensional asociado es bien conocido y consta en la bibliografía específica [6], [7] y [8], entre otros, donde en todos los casos, es importante determinar el coeficiente de transferencia térmica por convección.

El Manual del Ingeniero Químico (R. Perry) [9] es bien utilizado en la industria y cuenta con gran respaldo experimental, mientras que el trabajo de L. Nobel [4], cuentan con el respaldo del Joint Nuclear Research Center. Vinculando entre si las ecuaciones de continuidad de los desplazamientos y de dilatación térmica, incluidas en referencia [8], a través de la dilatación térmica, tenemos un sistema de ecuaciones térmico estructural acoplado, el cual puede ser resuelto, entre otros, mediante el Método de Diferencias Finitas.

Mediante este procedimiento, los resultados obtenidos de la distribución de temperatura y tensiones desarrolladas pueden ser presentados a partir de una formulación general adimensionalizada, expresadas en gráficos y tablas de rápida y práctica aplicabilidad.

En este camino, a continuación, se presenta un procedimiento alternativo para determinar la distribución térmica y el campo tensional en el cuerpo cilíndrico del reactor.

Suponiendo que la temperatura en un sector del cuerpo cilíndrico del reactor es independiente de las coordenadas axial y circunferencial, el problema queda expresado a través de la siguiente ecuación de conducción de calor, en coordenadas cilíndricas [6]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \text{ en } r_i \leq r \leq r_e \quad (1)$$

Con las siguientes condiciones de contorno y temporal:

$$h(T - T_b) = k \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{en } r = r_i ; t > 0 \quad (2.a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{en } r = r_e ; t > 0 \quad (2.b)$$

$$T = T_0 \quad \text{en } r_i \leq r \leq r_e ; t = 0 \quad (3)$$

Siendo:

$T(r,t)$ Temperatura para un valor de radio dado, función del tiempo;

r Coordenada radial;

t Tiempo;

k Conductividad térmica del material del recipiente;

c Calor específico;

ρ Densidad;

h Coeficiente de transferencia térmica por convección, entre la corriente del fluido (vapor) y la pared interna del coeficiente.

Donde, planteando las siguientes hipótesis:

a) c , ρ y k se consideran constantes e independientes de la temperatura.

b) El fluido circula por el interior de la virola del RPR, con una variación de temperatura T_b lineal con el tiempo entre un instante inicial t_0 arbitrario y un instante final t_f :

$$T_b(t) = T_{b0} + \frac{T_{bf} - T_{b0}}{t_f - t_0} \cdot (t - t_0) \quad (4)$$

T_{b0} es la temperatura del fluido en $t = t_0$ y T_{bf} su valor en $t = t_f$.

Adimensionalizando el problema diferencial, se definen las siguientes magnitudes:

Temperatura adimensional:

$$\theta(R, \tau) = \frac{T - T_{b0}}{T_{bf} - T_{b0}} \quad (5)$$

Coordenada radial adimensional:

$$R = \frac{r}{r_i} \quad (6)$$

Tiempo adimensional:

$$\tau = \frac{k}{c\rho r_i^2} t \quad (7)$$

Número de Biot:

$$Bi = \frac{r_i h}{k} \quad (8)$$

Introduciendo estas variables en el sistema diferencial (1-4), y luego de simples arreglos algebraicos, se llega al siguiente sistema diferencial:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} \quad \text{en } 1 \leq R \leq R_e \quad (9)$$

$$Bi(\theta - 1) = \frac{\partial \theta}{\partial R} \quad \text{en } R = 1; \tau > 0 \quad (10.a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = 0 \quad \text{en } R = R_e = r_e/r_i; \tau > 0 \quad (10.b)$$

$$\theta = 0 \quad \text{en } 1 \leq R \leq R_0; \tau = 0 \quad (11)$$

Para cada situación particular, geometría del recipiente, velocidad o caudal del vapor, la relación entre h y ν puede obtenerse a partir de relaciones conocidas de los números de Reynolds, de Nusselt y de Prandtl:

$$Re = \frac{VD}{\nu_b}; \quad Pr = \frac{\nu_b}{\alpha_b}; \quad Nu = \frac{hD}{k_b} \quad (12)$$

donde:

- ν Velocidad del fluido;
- D Diámetro interno de la virola;
- μ_b Viscosidad cinemática del fluido;
- ν_b Viscosidad dinámica del fluido, $\nu_b = \mu_b / \rho_b$
- ρ_b Densidad “bulk” del fluido;
- α_b Difusividad térmica del fluido;
- h Coeficiente de transferencia térmica pelicular;
- k_b Conductividad térmica del fluido.

La relación matemática y empírica entre el Re del vapor y el Nu, se analiza en las referencias [5] y [9], por lo tanto, los únicos parámetros adimensionales del problema son entonces:

$$A = \frac{\theta_{bf} - \theta_{b0}}{\tau_f - \tau_0} = \frac{c\rho r_i^2}{k(t_f - t_0)} \quad (13)$$

$$\delta = \frac{r_e - r_i}{r_i} = R_e - 1 \quad (14)$$

2.2. Análisis de Deformaciones y Tensiones

El tratamiento analítico general para el presente problema es de complicada de resolución, por lo cual se propone un solución a partir del método de diferencias finitas, con un esquema explícito para las derivadas de primer grado y desarrollo de la Serie de Taylor, utilizando los primeros tres términos para la derivada espacial de segundo orden.

Para el parámetro A (expresión (13)), se consideran los valores de θ_{bf} , θ_{b0} , τ_f y τ_0 que corresponden al caso de carga. Por su parte, para el parámetro δ (expresión (14)), se consideran los valores de r_e y de r_i de las diferentes virolas a analizar.

En la Fig. 4 se presenta el recinto de cálculo y las condiciones de contorno.

Empleando una grilla en diferencias finitas, $(x_i, t_j, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m)$, se tiene:

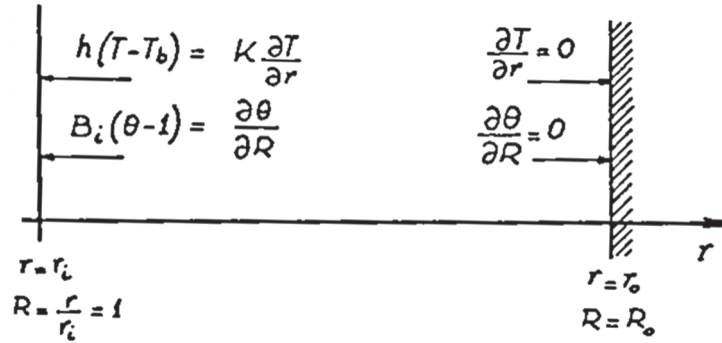


Fig. 4. Recinto de cálculo y condiciones de contorno.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{\Delta \tau} (\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}); \quad \Delta \tau = \tau_{j+1} - \tau_j \quad (15.a)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} = \frac{1}{\Delta R^2} [\theta_{i-1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i+1,j}]; \quad \Delta R = R_{i+1} - R_i \quad (15.b)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} = \frac{1}{R \Delta R} [\theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}]; \quad \Delta R = R_{i+1} - R_i \quad (15.c)$$

Finalmente reemplazando las ecuaciones (15.a), (15.b) y (15.c) en la (9), resulta:

$$\theta_{i,j+1} = a\theta_{i+1,j} + b\theta_{i,j} + d\theta_{i-1,j} \quad (16)$$

siendo:

$$a = \frac{R \Delta \tau + \Delta R \Delta \tau}{R \Delta R^2} \quad (17)$$

$$b = \frac{R \Delta R^2 + 2 R \Delta \tau - \Delta \tau \Delta R}{R \Delta R^2} \quad (18)$$

$$d = \frac{\Delta \tau}{\Delta R^2} \quad (19)$$

El dominio espacial está comprendido entre $R=1$ y $R = R_e = 1 + \delta$, siendo las condiciones de borde:

$$Bi(\theta_{1,j} - 1) = \frac{1}{\Delta R} [\theta_{2,j} - \theta_{1,j}] \quad \text{en } R = 1 \quad (20)$$

$$\theta_{n,j} = \theta_{n-1,j} \quad \text{en } R = R_e = 1 + \delta \quad (21)$$

De esta manera, queda así definido un sistema de diferencias finitas de tres incrementos, una para la coordenada espacial y las dos restantes para incrementos de la variable temporal.

Dicha propuesta se implementa en un programa en lenguaje Fortran, desarrollado expresamente para resolver este problema, denominado FORTRAN DIFFIN.

Una vez resueltas estas ecuaciones de forma numerica, se debe obtener el estado tensional adimensionalizado.

En este camino, planteando las ecuaciones constitutivas, de equilibrio y de compatibilidad, adecuadamente combinadas, se conduce a un sistema de ecuaciones diferenciales (generalmente en derivadas parciales) con sus respectivas condiciones de contorno [5], que permite resolver el tema tensional.

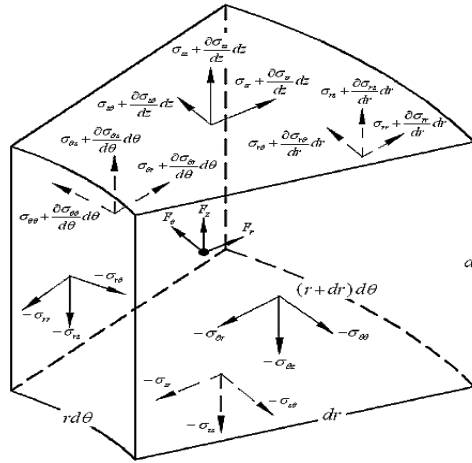


Fig. 5. Tensiones en un elemento sólido infinitesimal en coordenadas cilíndricas.

En la Fig. 5, se representa un elemento diferencial de volumen, en coordenadas cilíndricas (r, θ, z), donde se presentan las tensiones expresadas en dicho sistema coordenado.

Suponiendo que el cuerpo cilíndrico del reactor es lo suficientemente largo como para que las condiciones de borde no varíen en la dirección z , nos queda:

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \frac{\partial \tau_z}{\partial z} = 0 \quad (22)$$

El equilibrio en las direcciones axial y circunferencial se satisface automáticamente, por lo cual, planteando el equilibrio en la dirección radial y despreciando infinitésimos de segundo orden, se llega a la ecuación siguiente:

$$\sigma_r \cdot r \cdot d\theta + 2\sigma_\theta \cdot dr \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr\right) (r + dr) \cdot d\theta \Rightarrow \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (23)$$

Adimensionalizando, se llega a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\sigma_r(R, \tau)}{E\alpha(T_{bf} - T_{bo})} = \frac{1 - \frac{1}{R^2}}{R_e^2 - 1} \int_1^{R_e} \theta(R', \tau) R' dR' - \frac{1}{R^2} \int_1^R \theta(R', \tau) R' dR \quad (24)$$

$$\frac{\sigma_\theta(R, \tau)}{E\alpha(T_{bf} - T_{bo})} = \frac{1 + \frac{1}{R^2}}{R_e^2 - 1} \int_1^{R_e} \theta(R', \tau) R' dR' + \frac{1}{R_e^2} \int_1^{R_e} \theta(R', \tau) R' dR' - \theta(R, \tau) \quad (25)$$

$$\frac{\sigma_z(R, \tau)}{E\alpha(T_{bf} - T_{bo})} = \frac{4\nu - 1}{R_e^2 - 1} \int_1^{R_e} \theta(R', \tau) R' dR' - \theta(R, \tau) \quad (26)$$

Como método de integración, para obtener tensiones, se usó la Regla Numérica de Simpson, incluida en el programa FORTRAN DIFFIN:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \quad (27)$$

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Para el presente estudio se adopta una variación lineal de la temperatura, entre los siguientes valores extremos inicial y final:

$$T_{bo} = 40^{\circ}\text{C} \quad \text{para } t_o = 0 \text{ seg.}$$

$$T_{bf} = 325^{\circ}\text{C} \quad \text{para } t_f = 21000 \text{ seg.}$$

Los datos geométricos para las dos virolas a considerar en el análisis son:

$$r_i = 1,035 \text{ m}; r_e = 1,340 \text{ m, resultando } \delta = 0,295$$

$$r_i = 1,586 \text{ m}; r_e = 1,716 \text{ m, resultando } \delta = 0,082$$

De acuerdo con las ecuaciones (8), (13) y (14), utilizando las variables para vapor de agua, definidas en [5] y [10], y las propiedades del material indicadas en [3], se tiene el coeficiente de transferencia térmica $h = 3370 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Para el sector superior del reactor, donde δ es igual a 0.295, resulta que la temperatura y tensiones circunferencial y longitudinal adimensionalizados se presentan en Figuras 6.1 a 6.3.

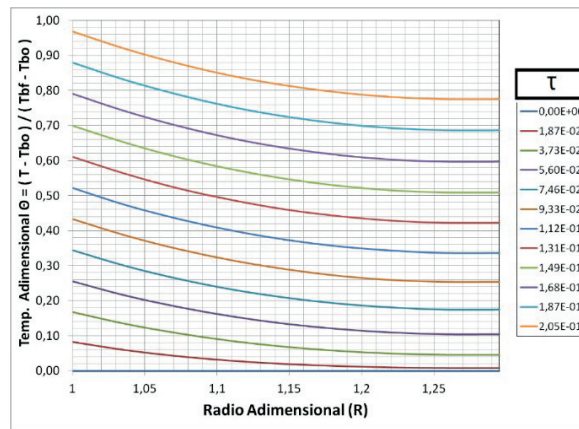


Fig. 6.1. Temperatura en función del Radio y distintos Tiempos. Resultados adimensionales.

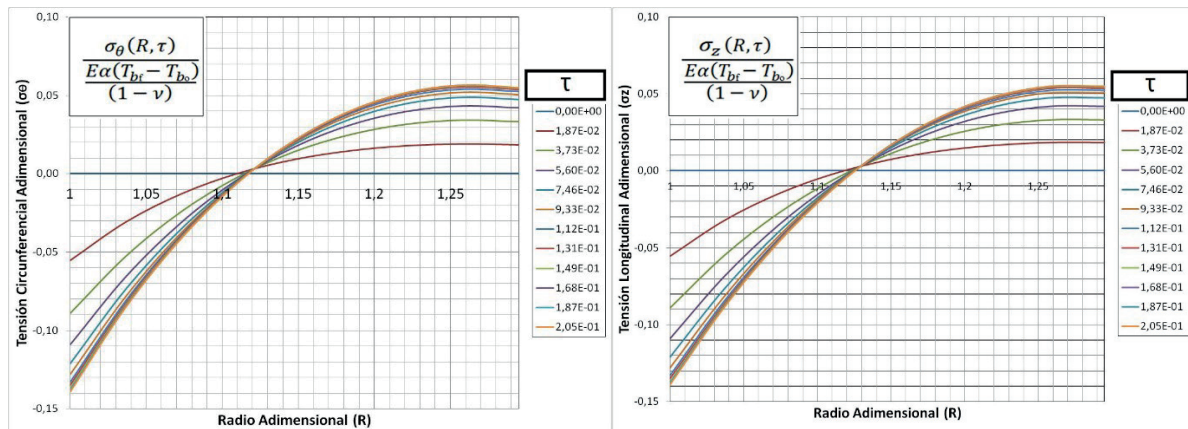


Fig. 6.2-6.3. Tensiones Circunferencial y Longitudinal en función del Radio y distintos Tiempos. Resultados adimensionales.

Siendo $A = 4,842$ y $Bi = 86,05$

Para el sector inferior del reactor, donde δ igual a 0.082, resulta que la temperatura y tensiones circunferencial y longitudinal adimensionalizados se presentan en figuras 6.4 a 6.6.

Siendo $A = 11,370$ y $Bi = 131,87$

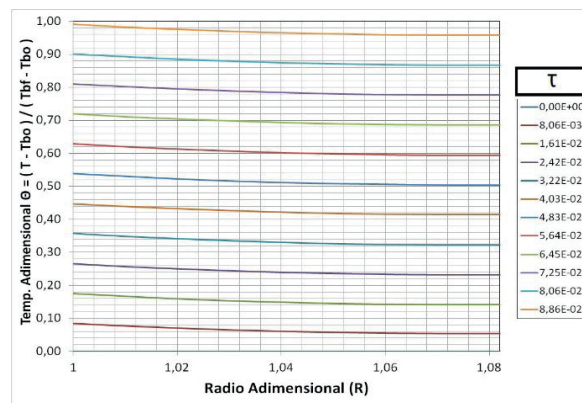


Fig. 6.4. Temperatura en función del Radio y distintos Tiempos. Resultados adimensionales

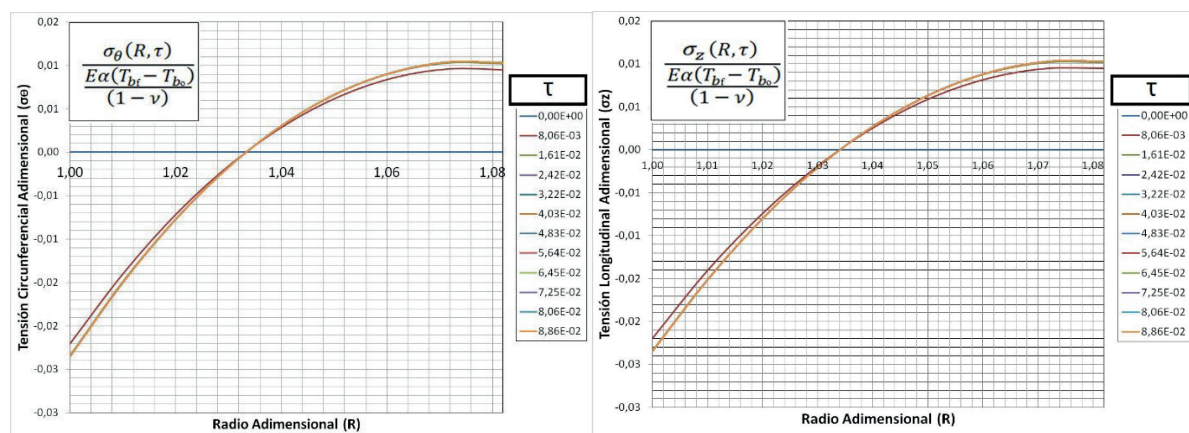


Fig. 6.5-6.6. Tensión Circunferencial y Longitudinal en función del Radio y distintos Tiempos. Resultados adimensionales.

4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Para el análisis se ha seleccionado el sector que se corresponde con la virola superior, con radio interior r_i de 1,035 m y exterior r_e de 1,340 m, portratarse de las tensiones mayores que las alcanzadas en la inferior.

Previamente y a los fines de interpretación teórica, se presenta el desarrollo y tratamiento numérico del método de elementos finitos [12] y [13].

4.1. Descripción del método de los Elementos Finitos.

Sea $\Omega \subset R^3$ un dominio (abierto y acotado) ocupado por un sólido, cuyo contorno $\partial\Omega = \Gamma$ está conformado por la unión disjunta de una frontera Γ_D (denominada frontera de Dirichlet) asociada a las condiciones de borde geométricas (CBG), y una frontera Γ_N (denominada frontera de Neumann), asociada a las condiciones de borde naturales (CBN) (es decir $\partial\Omega = \Gamma = \Gamma_D \cup \Gamma_N$ y $\Gamma_D \cap \Gamma_N = \emptyset$).

La formulación fuerte del problema de elasticidad estacionario puede expresarse en los siguientes términos:

Siendo $[H^n]^o$, $[L^n]^o$ y $[T^n]^o$ espacios funcionales, que son conjunto de funciones continuas de orden n , y definidas en un espacio vectorial de orden o , cuyo dominio puede ser el sólido en cuestión (Ω) o bien sus fronteras (Γ_D , Γ_N), y dado:

- un campo vectorial representativo de las fuerzas volumétricas $f \in [L^2(\Omega)]^3$.
- un campo prescrito en la frontera de Dirichlet $g \in [H^1(\Gamma_D)]^3$.

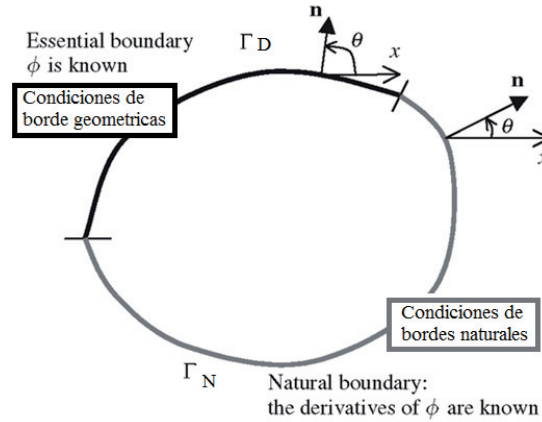


Fig. 7. Condiciones de bordes a aplicar sobre el sólido en estudio.

- un campo vectorial en la frontera de Neumann $h \in [L^2(\Omega)]^3$.

Y conocidos los parámetros positivos λ y μ , se busca la solución vectorial $u\{x,y,z\} \in [H^1(\Omega)]^3$ y el tensor de tensiones simétrico σ tal que cumpla:

$$\nabla \cdot \sigma = -f \text{ en } \Omega \quad (28)$$

$$\varepsilon(u) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) \text{ en } \Omega \quad (29)$$

$$\sigma(u) = \lambda \text{tr}(\varepsilon)I + 2\mu\varepsilon \text{ en } \Omega \quad (30)$$

Satisfaciendo las condiciones de borde:

$$u = g \text{ en } \Gamma_D \text{ (Condición de borde geométrica)} \quad (31)$$

$$(\lambda \text{tr}(\varepsilon)I + 2\mu\varepsilon) \cdot \mathbf{n} = h \text{ en } \Gamma_N \text{ (Condición de borde natural)} \quad (32)$$

Donde, para cierto dominio ψ , L^2 es el conjunto de las funciones de cuadrado integrable, definido como:

$$L2(\psi) = \{u \text{ integrables} : \int \psi u^2 d\psi < \infty\} \quad (33)$$

y donde H^1 es el espacio de Sobolev de orden 1, definido como:

$$H1(\psi) = \left\{u \in L2(\psi) : \frac{\partial u}{\partial x_i} \in L2(\psi), \forall i\right\} \quad (34)$$

La expresión (28) representa la condición de equilibrio de un elemento diferencial de sólido, mientras que la expresión (29) plantea la compatibilidad geométrica entre deformaciones y tensiones, donde ε es el tensor de pequeñas deformaciones, el cual que puede interpretarse como la componente simétrica del tensor gradiente de desplazamientos.

La expresión (30) representa la ley de Hooke generalizada escrita en términos de los parámetros de Lamé (λ y μ) que mantienen, con el módulo de elasticidad del material E y con el coeficiente de Poisson ν , las siguientes relaciones:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (35)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (36)$$

Con el objeto de simplificar el manejo analítico, las ecuaciones anteriores pueden reformularse de modo de asociar la única incógnita al campo de los desplazamientos $u\{x,y,z\}$.

La elección de los desplazamientos como variables básicas del problema obedece a que, conocidos estos, la obtención de los campos de deformaciones y tensiones requiere simples derivaciones y operaciones algebraicas ordinarias.

Para obtener tales expresiones, se parte de las ecuaciones de equilibrio, de las ecuaciones de compatibilidad y de la ley de comportamiento lineal isótropo, escritas (por comodidad) de acuerdo a la notación de índices repetidos:

$$\sigma_{ij,j} = -f_i \quad (37)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} \quad (38)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda u_{k,k}\delta_{ij} \quad (39)$$

Agrupando se tiene:

$$\mu u_{i,jj} + \mu u_{j,ij} + \lambda u_{k,kj}\delta_{k,j} = -f_i \quad (40)$$

Y como u es una función bien definida (sin discontinuidades ni inflexiones abruptas), se cumple que:

$u_{j,ij} = u_{jji}$, por lo que resulta:

$$(\lambda + \mu)u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} = -f_i \quad (41)$$

Las ecuaciones (38), (39) y (40), con $i = 1, 2, 3$, se conocen como ecuaciones de Navier y admiten ser expresadas en función de operadores usuales en teoría vectorial de campos, lo que resulta cómodo si se han de expresar en otros sistemas coordenados no cartesianos:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot u) + \mu\Delta u = -f \quad (42)$$

El problema a resolver, expresado en términos de una única magnitud incógnita, resulta:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot u) + \mu\Delta u &= -f \text{ en } \Omega \\ u &= g \text{ en } \Gamma D \\ (\lambda \operatorname{tr}(\varepsilon(u))I + 2\mu\varepsilon(u)) \cdot \underline{n} &= h \text{ en } \Gamma N \end{aligned} \quad (43)$$

La resolución del problema mediante la aplicación del método de elementos finitos, en su formulación variacional, exige la multiplicación de la ecuación diferencial por una función de prueba bien comportada, y su posterior integración en todo el dominio.

$$\int \Omega [(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot u) + \mu\Delta u] \cdot v \, d\Omega = -\int \Omega f \cdot v \, d\Omega \quad (44)$$

La formulación fuerte de (43) es equivalente a la formulación débil de (44), para todo:

$$v \in [H1D(\Omega)]^3 \text{ con } H1D(\Omega) = \{v \in H1(\Omega) : v \text{ satisface las CBG en } \Gamma D\}$$

Al proponer una solución aproximada expresada como combinación lineal de ciertas funciones de forma, y elegir una función de prueba, la forma integral de (44) se transforma en un sistema lineal de ecuaciones algebraicas en los coeficientes de la combinación lineal.

A partir de la resolución de dicho sistema, se obtiene la solución aproximada del problema original. En general, el método de elementos finitos permite obtener sistemas algebraicos conformados por una matriz del sistema del tipo rala, lo cual facilita su resolución.

Debe considerarse, sin embargo, que en modelos reales, las condiciones del problema físico en general no son estacionarias sino transitorias, y la ecuación de equilibrio involucra una derivada temporal de segundo orden.

En problemas termo-mecánicos deben incluirse términos que involucren al campo escalar de temperaturas en todo el dominio, el cual constituye una solución del problema de conducción tridimensional del calor, sujeto a las condiciones de borde apropiadas. El problema térmico puede expresarse de acuerdo a:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \theta}{\partial t(x, t)} &= \alpha \Delta \theta + G \text{ en } \Omega \\
q_s &= -k \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right) \text{ en } \Gamma q \\
\theta &= \theta_b \text{ en } \Gamma b \\
\theta(x, 0) &= \theta_0(x) \text{ en } \Omega \text{ (Condición inicial)}
\end{aligned} \tag{45}$$

Donde cada término se corresponde con:

- x Vector de posición genérico,
- $\theta(x, t)$ Campo escalar de temperaturas en el sólido,
- α Difusividad térmica del material,
- G Término fuente de la ecuación del calor,
- q_s Flujo de calor en la frontera de Neumann Γq ,
- k Conductividad térmica del material,
- θ_b Temperatura prescrita en la frontera de Dirichlet,

$$\Gamma b \quad (\text{con } \Gamma q \cup \Gamma b = \Gamma = \partial \Omega \text{ y } \Gamma q \cap \Gamma b = \Phi),$$

θ_0 Campo inicial de temperaturas.

El acoplamiento entre los problemas elástico y térmico se expresa mediante una ley constitutiva modificada (expresión 46) que involucra una propiedad térmica del material (β), en adición a las 2 constantes elásticas independientes (λ y μ).

$$\sigma(u) = \lambda \text{tr}(\varepsilon)I + 2\mu\varepsilon - \beta(\theta - \theta_0)I \quad \text{en } \Omega \tag{46}$$

Siendo I el Tensor Identidad

El procedimiento de análisis descripto es programable y se puede llevar a cabo a partir de la utilización de un programa de elementos finitos.

En este camino, se plantea un modelo de cálculo tridimensional 3D de elementos finitos, utilizando el programa Ansys Student [1] para la resolución del campo elástico térmico y de tensiones.

Como ya se mencionó para dicha comparación, el estudio se realiza para un sector que se corresponde con la virola superior de radio interior r_i de 1,035 m y exterior r_e de 1,340 m, por corresponder tensiones considerablemente mayores que las presentes en la virola inferior.

4.2. Presentación del Modelo Tridimensional 3D

Con el objeto de corroborar los resultados obtenidos del estudio presentado, se plantea un modelo tridimensional de elementos finitos, altamente densificado, para determinar la distribución de temperaturas y el estado tensional sobre el cuerpo del recipiente completo, incluyendo las transiciones y/o discontinuidades estructurales.

Para este caso, donde se requiere mayor detalle en el modelo planteado, es que se utiliza el Programa Ansys Student [1], para la resolución del campo elástico térmico y de tensiones, el cual presenta una gran versatilidad en cuanto a la selección del tipo de elementos utilizados y la posibilidad de contar con un programa para encarar un análisis detallado de integridad estructural.

Por lo tanto, se propone un modelo de elementos finitos tridimensional, utilizando los elementos Tetraédricos de 4 nodos externos y 6 nodos internos, identificados como C3D10: 10-Node Quadratic Triangular Prismatic Element del programa Ansys.

Teniendo en cuenta el plano de simetría geométrica y de cargas del recipiente, se consideró la mitad del mismo, es decir un sector de 180 grados, colocando las condiciones de borde adecuadas que representan el comportamiento completo del componente, Fig. 8.

Se ha propuesto una malla altamente densificada, refinando en las zonas más complejas del cuerpo del recipiente donde se presentan curvaturas pronunciadas o posibles discontinuidades estructurales.

Para las cargas térmicas, se considera que el flujo por convección (intercambiado con el vapor), en la zona interior del recipiente presenta un coeficiente de intercambio de película dado en acuerdo con las

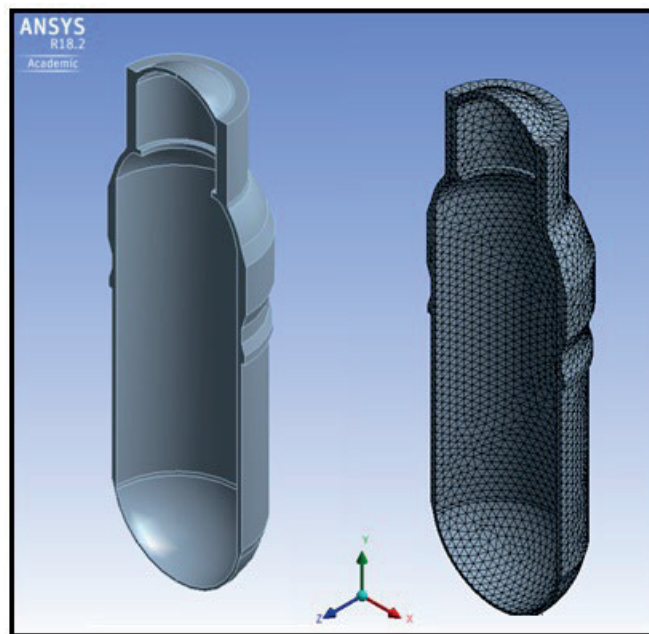


Fig. 8. Modelo de Elementos Finitos tridimensional del recipiente en estudio.

características del proceso (*Convective Heat Film Coefficient*) y datos tomados de simulaciones de proceso operativos del reactor [14, 15], con puntos límites de:

$T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $t = 0\text{ seg.}$

$T = 325\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $t = 21000\text{ seg.}$

Para las condiciones de borde, se consideró el plano de simetría XY, restringiendo los desplazamientos perpendiculares al plano de simetría, según eje Z.

A partir del modelo planteado, en la Fig. 9, se presentan los resultados obtenidos del estado tensional equivalente de Von Mises, referidos a un sistema de coordenadas cilíndricas, donde se observa que la Tensión Máxima alcanzada en la parte superior del cuerpo del recipiente, en el sector cilíndrico es de 143,53 MPa.

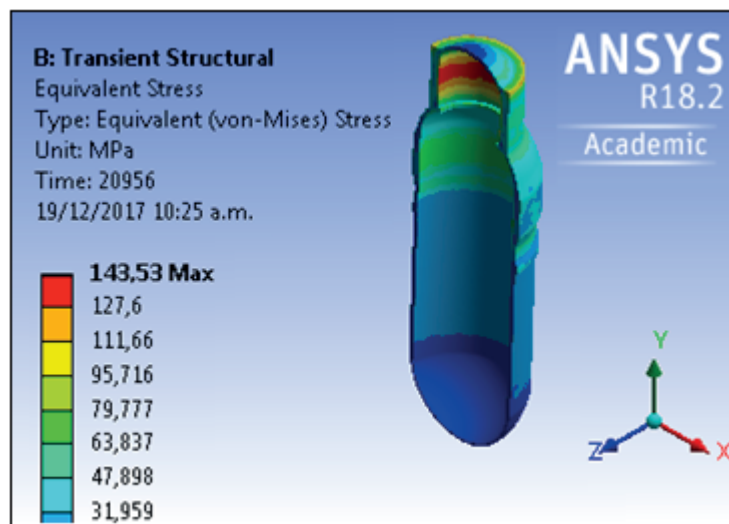


Fig. 9. Tensiones de Von Mises (MPa) del reactor.

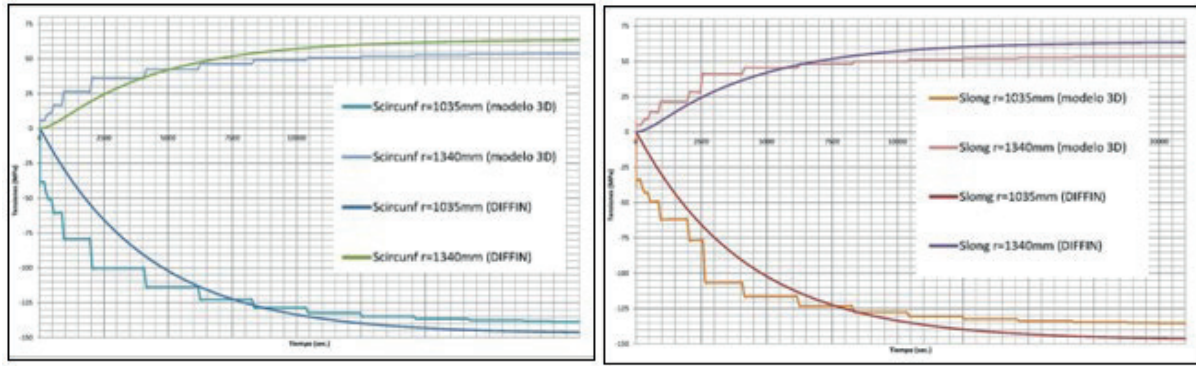


Fig. 10. Tensiones Circunferenciales (Scircunf.) y Longitudinales (Slong.) del Modelo 3D *versus* Diferencias Finitas (Programa FORTRAN DIFFIN).

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ELEMENTOS FINITOS, RESPECTO DEL DE DIFERENCIAS FINITAS

Para los fines de la comparación, se toman los resultados obtenidos en la virola superior, tomando los valores de las tensiones Circunferenciales y Longitudinales, Fig. 10.

A continuación, se presenta la comparación de los resultados obtenidos mediante el Modelo Tridimensional 3D, respecto de Diferencias Finitas, a saber:

En ambas comparaciones, se observa que los resultados obtenidos mediante el procedimiento computacional por elementos finitos, respecto de la solución obtenida mediante Diferencias Finitas, proporciona un aceptable grado de aproximación, del orden del 5 al 8 por ciento.

Como ya fue mencionado anteriormente y teniendo en cuenta el programa de cálculo utilizado en versión estudiantil, y acotada dicha versión en su alcance y tiempos, los resultados obtenidos para los primeros instantes iniciales no deberían ser considerados para su comparación, ya que el paso de tiempo adoptado es excesivo para representar los gradientes de tensiones alcanzados.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología de análisis a partir del planteo de las ecuaciones diferenciales de Transferencia de Calor por conducción y convección resueltas por el Método de Diferencias Finitas, para determinar la distribución térmica y el estado tensional sobre las paredes cilíndricas de un reactor de baja potencia para su uso en investigación científica, cuyo diseño se encuadra entre las denominadas “Centrales Modulares de Última Generación”, válido para aquellas zonas lo suficientemente alejadas de transiciones o cambios bruscos o ahusamientos del espesor.

El método de diferencias finitas propuesto fue resuelto a partir de la elaboración de un programa computacional específico, en lenguaje Fortran, desarrollado para este trabajo y denominado FORTRAN DIFFIN, el cual presenta sus resultados de la distribución de temperatura y tensiones, expresados en gráficos y tablas mediante una formulación general adimensional, que permite una interpretación muy rápida en tiempos de ingeniería y de sencilla aplicación.

Para corroborar los resultados obtenidos, se planteó un modelo tridimensional por elementos finitos, utilizando el programa Ansys [1]. De dicha comparación se constataron resultados muy similares, con pequeñas diferencias en sus magnitudes, ya que se trataba de la utilización de un programa acotado en la cantidad de elementos, para uso académico.

El estudio se llevó a cabo bajo los lineamientos del Código ASME Sección III División 1, Sub-Sección NB “Quality Class” Clase 1 [2]. El estado tensional obtenido deberá combinarse con el resto de los estados de cargas presentes, en particular peso y presión.

Si bien el procedimiento propuesto trata de un componente cuyo proceso está relacionado con su uso en la industria nuclear, el alcance y conceptos generales son aplicables para un reactor de características similares, utilizado en la industria convencional.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ANSYS Program, Student Versión 18.1.
- [2] BPVC Section III, *Rules of Constructions for Nuclear Facility Components* (2015)
- [3] Especificaciones Técnicas para el material: ASME SA508 Gr.3.
- [4] The heat transfer coefficient as a function of steam quality for high-pressure once through flow boiling, with determination of the transition points between the regions of particular heat transfer, L. Nobel, Joint Nuclear research Center, Ispra Establishment, Italy (1970)
- [5] WASP: Water and Steam Properties. Version 1.21, Katmar Software. South Africa (1995)
- [6] Ibrahim, H., Guzelbey Coupled Thermoelastic Analysis of Thick-Walled Pressurized Cylinders, Begum Kanhkama, Aysegul Abusoglu, *International Journal of Energy and Power Engineering* (2013)
- [7] Lindon Thomas, *Fundamentals of Heat Transfer*, 1st ed, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA (1980)
- [8] S. Timoshenko, *Strenght of material part 2, advanced theory and problems*, 3rd Edition, D. Van Nostrand Company Inc., Princenton, NJ (1956)
- [9] R. Perry, *Manual del Ingeniero Químico*, VI edición (1992)
- [10] M. Ragheb, *Boiling Water Reactors*, Chapter 3 (2014)
- [11] BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1, Edition 2015
- [12] Gatica, G.N., Marquez, A., Meddahi, S., "An augmented mixed finite element method for 3D linear elasticity problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **231**(2), 526-540 (2009)
- [13] Olivella, X.O., Agelet de Saracibar Bosch, C., *Mecánica de medios continuos para ingenieros*. Edición UPC (2000)
- [14] Thermo-Mechanical Stress Analysis of PWR Pressure Vessel and Nozzles under Grid Load-Following Mode, Argonne National Laboratory, ANL/LWRS-16/01
- [15] Desarrollo de una formulación general adimensional para la temperatura y las tensiones térmicas en el cuerpo de un reactor de investigaciones para su uso en la Industria Convencional y Nuclear, Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural Mecánica, UTN-FRH, Ing. Claudio Cangelosi, Ing. Hector Sanzi (2019)

THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF A REACTOR USING THE FINITE DIFFERENCE METHOD AND ITS VERIFICATION FROM THE FINITE ELEMENTS METHOD

Abstract – High technological industrial plants such as petrochemicals, refineries, chemicals, food, metallurgical, nuclear, among others, have pressure container components, pipes and equipment operating in extreme conditions. At present, the technology achieved in the design of these plants, allow to operate with their equipment at high pressures and temperatures or in unfavorable situations in terms of degradation (mainly corrosion) of the materials, but always maintaining the safety and control limits required by their operators. The safety and economic damage that would mean the possible failure of equipment installed at the plant, in particular the case of reactors, designed to operate at high pressures and temperatures, require thorough and appropriate analysis to ensure their structural integrity over its lifetime. In recent years, new specifications have emerged for the proper selection of materials and to meet the most demanding analysis requirements, which are incorporated in design, manufacturing and inspection. A reactor of low power nuclear origin for use in scientific research or for energy supply in isolated regions, is taken as the basis of this work, whose design falls among the so-called "Modular Last Generation Centrals". For the analysis, the thermal distribution over the reactor body was determined through the approach of the differential Heat Transfer equations, resolved by the Finite Difference Method, where the thermal distribution and its associated tension status and where the results are presented in a-dimensional form, simple to resolve and practical to use. To corroborate the results obtained, a three-dimensional model was raised by finite elements method.

Keywords – Natural Convection, Thermal Origin Stresses, Finite Elements.



CONTROLE ATIVO DE RUÍDO APLICADO A UMA ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO DE GÁS

TÉO CERQUEIRA REVOREDO¹, MICHEL POMPEU TCHEOU¹, RAFAEL COSMO DE ALMEIDA¹, VALMIR DOS SANTOS NOGUEIRA JUNIOR²

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
Rua São Francisco Xavier nº 524, Sala 5001-E, Maracanã
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, CEP:20550-900

²Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Instrumentação e Óptica Aplicada (PPGIO)
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
Av. Maracanã, 229, Bloco E, 5o Andar Maracanã – Rio de Janeiro/Rio de Janeiro, Brasil
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Escola de Engenharia - Campus da Praia Vermelha
Rua Passo da Pátria, 156 - São Domingos - Bloco E - 3º andar, Sala 311 - Niterói - Rio de Janeiro, Brasil

(Recibido 29 de abril de 2020, para publicación 14 de octubre de 2020)

Resumo – Com base no conceito de controle ativo de ruído, no qual utiliza-se a superposição destrutiva de sinais para cancelamento de ruídos indesejados, este trabalho apresenta a simulação computacional de um sistema para supressão de ruídos em ambiente industrial, tendo como ponto de partida medições realizadas em uma Estação de Compressão de Gás. O algoritmo implementado para a redução de ruído é fundamentado na teoria de filtros adaptativos, aplicando-se filtros com coeficientes variáveis adaptados por algoritmo específico, de modo a obter uma resposta adequada ao objetivo do sistema proposto. O método é explorado de maneira a verificar sua eficácia na atenuação de ruídos específicos, característicos do ambiente em análise, almejando permitir a comunicação entre pessoas em ambientes com níveis elevados de ruído. Os sinais analisados foram adquiridos em campo para melhor representatividade dos resultados. Os resultados alcançados comprovam a possibilidade de aplicação da técnica proposta para supressão de ruídos, embora ressaltem a dificuldade em se filtrar de maneira eficaz os sinais de voz no ambiente estudado.

Palavras-chave – Controle Ativo de Ruído, Filtros Adaptativos, Estação de Compressão de Gás.

1. INTRODUÇÃO

O ruído é constituído de um grande número de vibrações acústicas com relações de amplitude e fase distribuídas aleatoriamente [1], e produz distúrbios em todo o organismo humano [2]. Não por acaso, há legislações que regulamentam os níveis e tempo de exposição máxima que um trabalhador pode estar submetido em cada ambiente, tornando necessária a implementação de métodos que eliminem ou atenuem estes sons indesejados. Tais métodos de controle do ruído podem ser classificados em duas grandes classes: ativo e passivo.

O controle passivo [3] consiste no isolamento acústico do ambiente através de barreiras mecânicas de materiais isoladores, silenciadores, absorvedores ou amortecedores. É uma técnica eficiente e de baixo custo, quando aplicada em ambientes com ruídos formados por ondas predominantes de média e alta frequência.

O controle ativo de ruído é um método mais indicado para baixas frequências [3], baseado na interferência destrutiva. A partir da análise e do processamento do sinal indesejado (ruído) é gerado outro sinal (antirruído) com a mesma amplitude, porém com fase invertida que, quando somado ao ruído original, o atenua. Para aplicação do método de controle ativo, faz-se necessário um estudo prévio do ambiente com a identificação das possíveis fontes de ruído e verificação de suas faixas de frequência [4].

Nesse contexto, este trabalho apresenta o levantamento e o estudo dos ruídos produzidos em um ambiente industrial, mais especificamente numa Estação de Compressão de Gás Natural. Partindo deste levantamento

e do mapeamento do ambiente, torna-se possível o desenvolvimento de um algoritmo para o controle ativo de ruído, capaz de atenuar o nível sonoro de sinais indesejados, possibilitando comunicação verbal adequada entre os operadores inseridos neste ambiente ruidoso. O algoritmo é capaz de se adaptar a modificações do campo sonoro, mantendo a comunicação verbal viável em diferentes pontos da planta.

2. PRINCÍPIO FÍSICO

A propagação de uma onda acústica, com uma amplitude limitada em aproximadamente 140 dB SPL, pode ser considerada um processo linear [5]. Desse modo, a superposição é explorada como princípio básico para o controle ativo de ruído. Duas topologias básicas são geralmente empregadas, a saber: malha fechada e malha aberta [6].

A topologia de malha fechada é exemplificada na Fig. 1. Nesta, o ruído (sinal em traçado contínuo) irradiado pela fonte é atenuado por um sinal antirruído (traçado pontilhado) emitido pelo sistema de controle ativo, o qual tem, idealmente, fase invertida porém amplitude idêntica ao sinal original. O sinal resultante é monitorado pelo microfone, sendo utilizado como referência para ajustes do sistema de controle quando necessário.

No sistema de malha aberta (Fig. 2), o sistema de controle capta o ruído (traçado contínuo) através do microfone de referência, que deve estar localizado o mais próximo possível da fonte cujo sinal deseja-se atenuar. O sistema processa este último, invertendo a sua fase e mantendo a sua amplitude. O sinal antirruído (traçado pontilhado) é, em seguida, gerado pela fonte secundária.

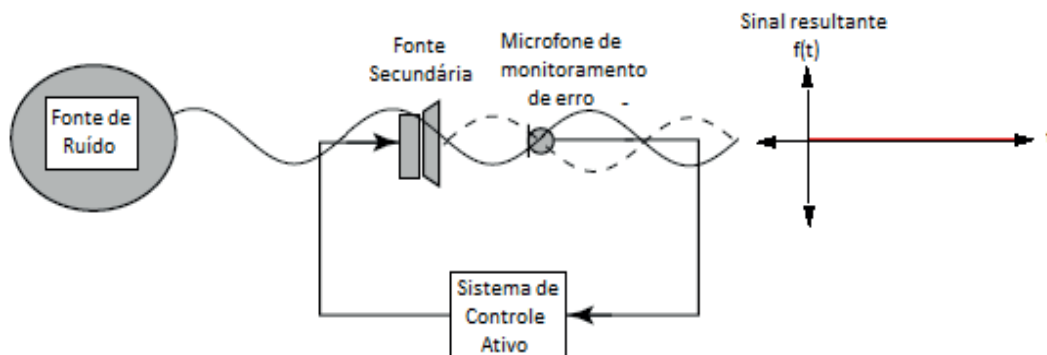


Fig. 1. Sistema de controle ativo de malha fechada.

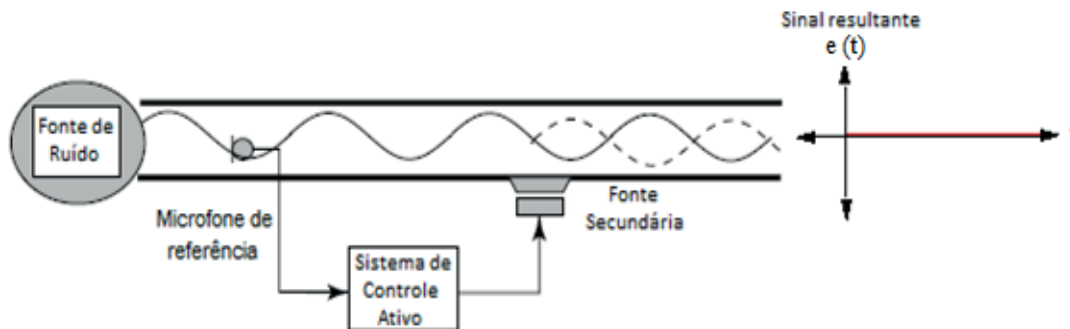


Fig. 2. Sistema de Controle Ativo em malha aberta.

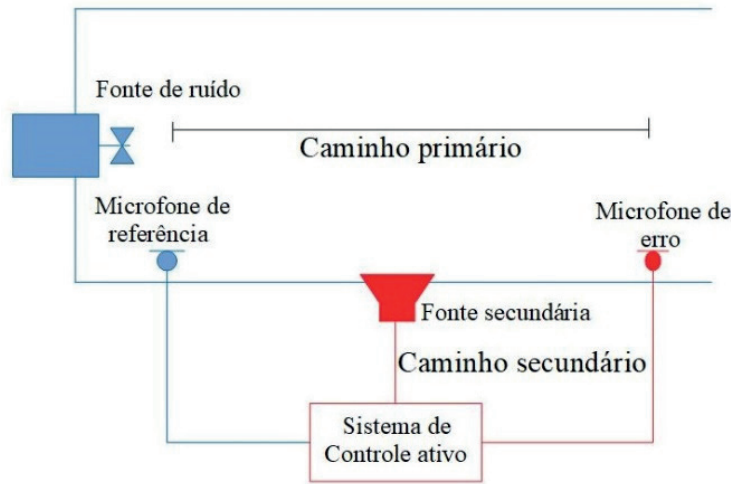


Fig. 3. Caminhos primário e secundário.

O caminho denominado primário é apresentado na Fig. 3. Trata-se de um modelo matemático que prevê as variações que o sinal pode sofrer durante a propagação. O caminho secundário [5] consiste no modelo matemático que contempla todas as características eletroacústicas do microfone de erro, do alto-falante emissor do antirruído e do caminho percorrido entre ambos. Na Fig. 3 são ilustrados todos os componentes que fazem parte da modelagem do caminho secundário.

A modelagem adequada do sistema torna desprezíveis as alterações inseridas pelas defasagens de propagação no resultado final simulado.

2.1. Aquisição de dados

O nível de intensidade sonora (NIS) em escala logarítmica e expressa em dB, é uma relação entre a pressão sonora no ambiente e uma pressão sonora de referência, definido por [7] como segue:

$$NIS = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{Pot. \text{ sonora}}{Pot. \text{ de ref.}} \right) dB \quad (1)$$

Na qual NIS é o nível de potência sonora, Pot. Sonora é a potência sonora da fonte emissora, expressa em Watt, e Pot. de ref. é o valor normalizado de 1 picoWatt. Portanto, sendo a potência de referência constante, a principal responsável pela variação do nível de intensidade sonora é a potência oriunda da fonte emissora, ou seja, do equipamento responsável pelo ruído [8].

Os métodos convencionais de controle passivo para supressão de ruído atenuam todas as ondas sonoras, inclusive as geradas pela voz humana, iniciando assim um processo de comprometimento da segurança operacional, dado que a comunicação é crucial. Nesse contexto, a característica de adaptabilidade do controle ativo o torna uma ferramenta atrativa a ser explorada para ambientes industriais, na tentativa de segregar as faixas de frequência que se deseja atenuar.

2.2. Filtros Adaptativos

A diferença entre modelos de sistemas físicos e modelos de sistemas idealizados lineares e invariantes no tempo (LIT) podem ser causadas pela variação dos parâmetros dos sistemas no decorrer do tempo, devido a uma variedade de fatores físicos. A ocorrência de mudanças imprevistas nas propriedades estatísticas das entradas externas e das perturbações aplicadas ao sistema podem acarretar mudanças no ambiente em que o sistema opera. A utilização da filtragem adaptativa produz um desempenho satisfatório ao longo de toda a gama de variações nos parâmetros [9]. Algumas técnicas já foram exploradas para sistemas de controle

ativo de ruído, tais como controladores PID, redes neurais artificiais [10], algoritmos genéticos [11], filtros adaptativos lineares [12], entre outros, e os resultados encontrados na literatura são relevantes.

A filtragem adaptativa consiste na aplicação de um filtro cujos coeficientes são adaptados de modo a aproximar o comportamento de um dado sistema desejado, com base em um sinal de referência. O modelo que melhor se adequa é o filtro digital FIR (*Finite Impulse Response*), dada suas características de estabilidade e rápida convergência. Sendo esta última fundamental para atendimento da propriedade do caminho secundário de curta resposta impulsiva. A velocidade de convergência se refere ao tempo de determinação do filtro por meio de algoritmos de otimização.

Para a otimização dos coeficientes do filtro, diversos algoritmos podem ser implementados, dentre os quais destacam-se: NLMS (*Normalized Least Mean Square*), LMS (*Least Mean Square*) e FXLMS (*Filtered X-Least Mean Square*) [13]. Este último é uma derivação do LMS, apresentando como única diferença a aplicação de um sinal filtrado na entrada.

Neste trabalho foram aplicados os métodos FXLMS e NLMS no desenvolvimento de um algoritmo para o controle ativo de ruído de uma Estação de Compressão de Gases.

2.3. Algoritmo Filtered-XLMS (F-XLMS)

As defasagens e atenuações inseridas pelo caminho secundário levam à necessidade do tratamento do sinal de entrada, de modo a compensar tais variações [12]. Assim, se faz necessária a implementação do algoritmo F-XLMS. A filtragem ocorre no sinal de entrada com base em um modelo matemático estimado através de um método adaptativo, utilizando o algoritmo NLMS.

Na Fig. 4, o sinal $x[n]$ (ruído) é obtido diretamente na fonte emissora e $d[n]$ é o sinal $x[n]$ incluindo as variações (defasagens e atenuações) inerentes ao processo de propagação do mesmo. Já o modelo do filtro $w[n]$ engloba seus coeficientes, os quais são otimizados pelo algoritmo adaptativo. Este último utiliza como referência o sinal de erro $e[n]$ e o sinal $x_c^*[n]$, o qual é filtrado pelo modelo estimado do caminho secundário $C^*[n]$, obtido por meio do NLMS. Esta operação de filtragem é descrita pela Equação (2), na qual M_{C^*} é o número de coeficientes do filtro FIR que representa a estimativa do caminho secundário, e é definido pelo usuário. A sua escolha adequada tem associação direta com eficácia da estimação do caminho secundário.

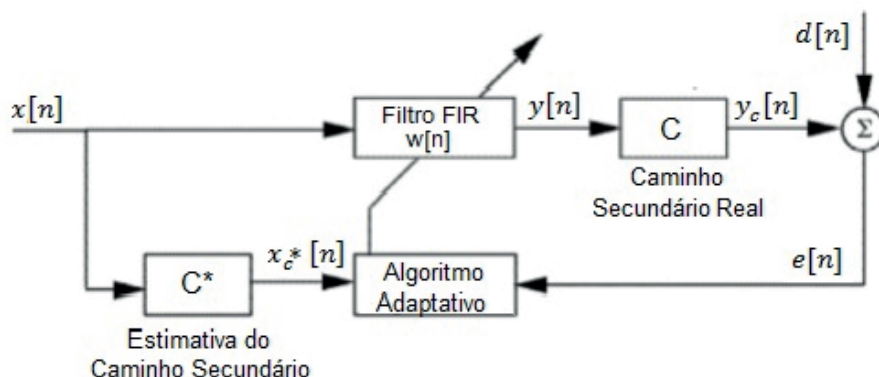


Fig. 4. Sistema de controle ativo F-XLMS.

Após a obtenção do sinal $x_c^*[n]$, este é utilizado como uma das referências para o cálculo da taxa de variação dos coeficientes do filtro ao longo do tempo, que pode ser definida como o gradiente do erro, representado por:

$$\Delta W_m[n] = \rho x_c^*[n] e[n] \quad (2)$$

na qual ΔW_m é taxa de variação do m -ésimo coeficiente do filtro adaptativo F-XLMS. ΔW_m é definida a partir do sinal filtrado $x_c^*[n]$, de uma constante ρ e do sinal de erro $e[n]$. Outro parâmetro de entrada a ser inserido pelo usuário é a taxa de aprendizagem μ . Tal parâmetro define a magnitude de variação do coeficiente a cada passo de integração do método.

Esses parâmetros devem ser definidos tanto no filtro adaptativo para estimação do caminho secundário quanto no filtro $W[n]$. Os valores dos parâmetros μ , ρ , M e M_{C^*} variam de acordo com o ambiente e as características do ruído, onde M e M_{C^*} possuem o mesmo tamanho.

A influência do parâmetro μ na variação do i -ésimo coeficiente do filtro, do algoritmo F-XLMS, pode ser representado conforme equação a seguir:

$$w_i[n+1] = w_i[n] + \mu \cdot x_{c^*}[n] \cdot e[n] \quad (3)$$

onde $w_i[n+1]$ é a definição do valor futuro do coeficiente. O $w_i[n+1]$ é definido pelo valor atual do coeficiente $w_i[n]$, adicionado ao valor atual do sinal de entrada filtrado $x_{c^*}[n]$, que por sua vez é multiplicado pelo sinal erro $e[n]$ e pelo taxa de aprendizagem μ . O sinal de saída do filtro principal $w[n]$, denotado por $y[n]$, é definido por:

$$y[n] = w_i[n] * x[n] = \sum_{m=0}^{M-1} w_i[m]x[n-m] \quad (4)$$

Na qual M é o comprimento do filtro. O sinal $y[n]$ por sua vez, será enviado para emissão ao meio. Porém, antes de ser emitido ele passa pelo caminho secundário, que também é modelado por um filtro, este representado pela letra C . O sinal de saída do caminho secundário é representado por $y_c[n]$ e pode ser definido como:

$$y_c[n] = c[n] * y[n] = \sum_{m=0}^{M_{C^*}-1} c[m]y[n-m] \quad (5)$$

Após obtenção do parâmetro $y_c[n]$, este é somado ao ruído a ser atenuado $d[n]$, obtendo-se, portanto, o sinal de erro $e[n]$, conforme demonstrado na equação abaixo:

$$e[n] = d[n] + y_c[n] \quad (6)$$

Depois da obtenção do sinal de erro $e[n]$, este é usado como referência para uma nova análise e adaptação do filtro, em busca do filtro ótimo.

É importante ressaltar que a escolha de M depende da ordem do sistema associado ao caminho secundário que se quer estimar, portanto, depende do ambiente em que se deseja empregar controle ativo de ruído. Além disso, quanto maior taxa de aprendizagem μ , maior é a velocidade de redução do ruído realizada pelo filtro adaptativo, contudo, menor é sua eficácia em regime permanente. Dessa forma, a escolha da taxa de aprendizagem adequada está diretamente relacionada ao comportamento do ruído, ou seja, se ele é um ruído de fundo perene ou com variações rápidas intermitentes.

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição do Ambiente

O ambiente escolhido para levantamento de dados e aplicação do método foi a Estação de Compressão de Campos Elíseos, localizada na cidade de Duque de Caxias no Estado do Rio de Janeiro. Ela é responsável por aumentar a capacidade de transporte de um sistema de gás natural (um Gasoduto), fornecendo a esse fluido energia suficiente para que possa ser transportado ao destino final.

O sistema principal da estação é equipado com quatro compressores acionados por turbinas, denominadas turbo máquinas. Ademais, existem na estação sistemas auxiliares responsáveis por garantir o seu funcionamento. O sistema de ar comprimido é composto por três compressores e é responsável pela captação do ar atmosférico e, após tratá-lo, de fornecê-lo na forma de ar comprimido para instrumentação local.

Outro sistema auxiliar é o de fornecimento de energia elétrica, composto por dois motores geradores que usam como fonte de força eletromotriz motores de combustão interna que, por sua vez, têm como combustível o próprio gás natural movimentado pela estação, garantindo sua autonomia.

3.2. Medições em Campo

3.2.1. Procedimento

As medições foram realizadas em horários nos quais se tem a maior demanda elétrica e de escoamento de gás natural da estação e, por consequência, os sistemas de compressão, ar comprimido e geração de energia elétrica são mais requisitados.

As gravações e medições dos níveis sonoros foram realizadas a uma altura de 1,60 m do solo e a uma distância de 1,00 m dos equipamentos. Essas medidas foram referenciadas na altura aproximada do operador, quando este está próximo ao equipamento.

Foram adquiridos dois tipos de dados, de forma simultânea: uma gravação do áudio na estação, a qual gerou um arquivo com extensão “.wav” para ser processado, e a medição do ruído, em dB SPL, ao qual o operador fica exposto naquele ambiente nas condições operacionais.

As anotações das medições em campo registraram os valores máximos de intensidade sonora (em dB SPL), o valor médio desta intensidade sonora (L_{avg}) ao qual o operador está submetido, as datas e os horários das medições.

Em cada ambiente foram geradas duas gravações, uma contendo apenas o ruído dos equipamentos em operação, para um melhor mapeamento do espectro de frequência dos equipamentos, e uma segunda gravação na qual foi adicionada a voz humana, através de uma pessoa recitando um texto padrão.

3.3.2. Equipamentos Utilizados

Foram utilizados uma máquina Fotográfica (Iphone 6®), um caderno de anotações, uma trena e um dosímetro de ruído Instrutherm® modelo DOS-500, com possibilidade de armazenamento de cinco eventos distintos, com registro de dados para verificação futura. As características do equipamento podem ser encontradas na página web <https://www.instrutherm.net.br/media/catalog/product/d/o/dos-600.pdf>.

As configurações utilizadas para medição estão representadas na Tabela 1. Para a gravação dos sinais de áudio foi utilizado programa específico conforme descrito na Tabela 2. O valor da taxa de amostragem é referenciado segundo o teorema da amostragem. Como o objetivo é o tratamento de sinais audíveis e a frequência máxima perceptíveis pelo ouvido humano é de 20 kHz, o dobro desta traria a taxa de 40 kHz. No entanto, para uma margem maior de análise, foi tomada a frequência de 24 kHz, o que implica em uma taxa de amostragem de 48 kHz.

Tabela 1. Configurações utilizadas no dosímetro de ruído para medição.

Parâmetro	Valor/Descrição
Nível de critério (L_c)	85 dB SPL
Nível limiar (L_t)	80 dB SPL
Taxa de troca (EA 5)	5 dB SPL
Tempo de resposta	Lento

Tabela 2. Programa de gravação.

Parâmetro	Valor/Descrição
Software	<i>Awesome Voice Recorder Pro</i> ® 3.3
Equipamento utilizado	Smartphone modelo Iphone 6®
Extensão dos arquivos gerados	'.wav'
Taxa de amostragem	48000 Hz
Bit rate	320 kbps

3.3. Dados Obtidos

Os parâmetros de configuração e os procedimentos de medição foram adaptados da norma regulamentadora NR15-TRT [14] e da Norma de Higiene Ocupacional NHO-01 NBR, [15]. Os critérios de medição foram adequados às especificações das normas vigentes e das orientações descritas no manual do fabricante [16].

A NR15-TRT estabelece que o ruído deve ser avaliado em decibel (dB SPL) com equipamento adequado, que as medidas devem ser efetuadas próximas ao ouvido do operador e com o equipamento configurado para circuito de resposta ou ponderação de tempo lenta (*Slow*), que fornece um intervalo maior para registro dos dados aferidos pelo sensor do equipamento.

A Norma de Higiene Ocupacional 01 [15] define os parâmetros de configuração do equipamento, tais como nível médio (L_{avg}), nível de critério ou critério de referência, nível limiar ou nível limiar de integração e taxa de troca ou incremento de duplicação de dose.

Os pontos de medição foram definidos com referência em desloamentos usuais do operador. Em cada um dos pontos do ambiente foram tomadas quatro medições.

3.3.1. Área dos compressores de ar

Em condições normais de operação da Estação existem três compressores de ar, que operam alternadamente. No entanto, entram em operação aleatoriamente, comandados pelo controlador lógico programável (CLP) local, de modo a atenderem a demanda de ar comprimido da estação. Assim, as medições foram tomadas de modo que garantissem a abrangência de todos os equipamentos em operação.

Na Fig. 5, as indicações em vermelho apresentam os locais onde foram realizadas as medições. Na Tabela 3 constam os dados aferidos em campo. Nesta os valores dos níveis máximos de ruído apresentam-se

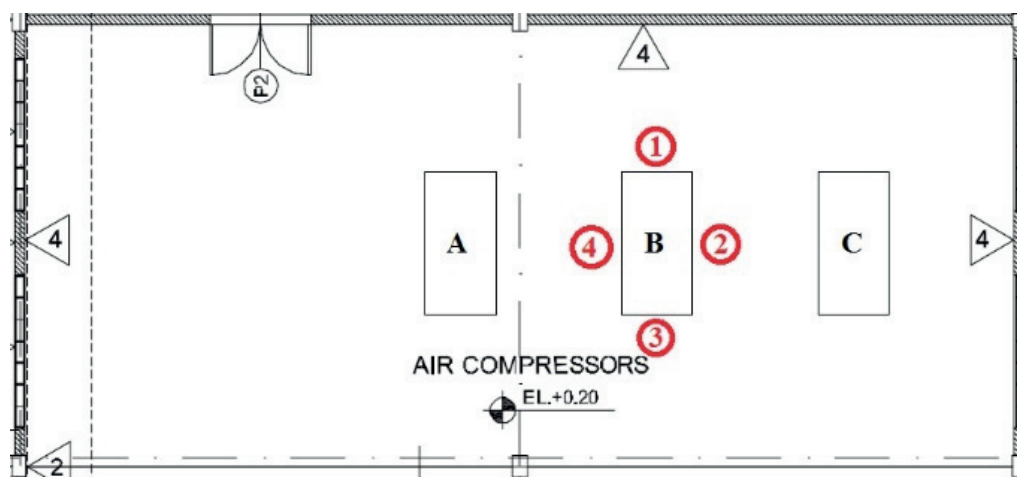


Fig. 5. Área dos compressores de ar.

Tabela 3. Dados medidos na área de compressores de ar.

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição à fonte	4 minutos
Nível máximo de ruído - Área 1	90,50 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 2	91,30 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 3	90,00 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 4	91,10 dB SPL
Nível Médio de ruído (L_{avg})	88,09 dB SPL

significativamente elevados. Por consequência, o nível médio (L_{avg}) também se mostra elevado e acima do valor de referência de 85 dB SPL, estabelecido pela norma NR-15 [14]. Portanto, a Tabela 3 explicita de forma clara a poluição sonora no ambiente ao qual o operador está sujeito.

3.3.2. Área de geradores

As medições foram executadas nas localizações apresentadas em vermelho na Fig. 6, pois no momento da medição, o gerador "B" estava operando e o "A" estava como reserva.

A Tabela 4 apresenta os valores aferidos em campo. Nota-se que estes ainda se encontram acima da referência de 85 dB SPL, estipulada por norma, caracterizando outro cenário crítico vivenciado pelos operadores da estação de compressão.

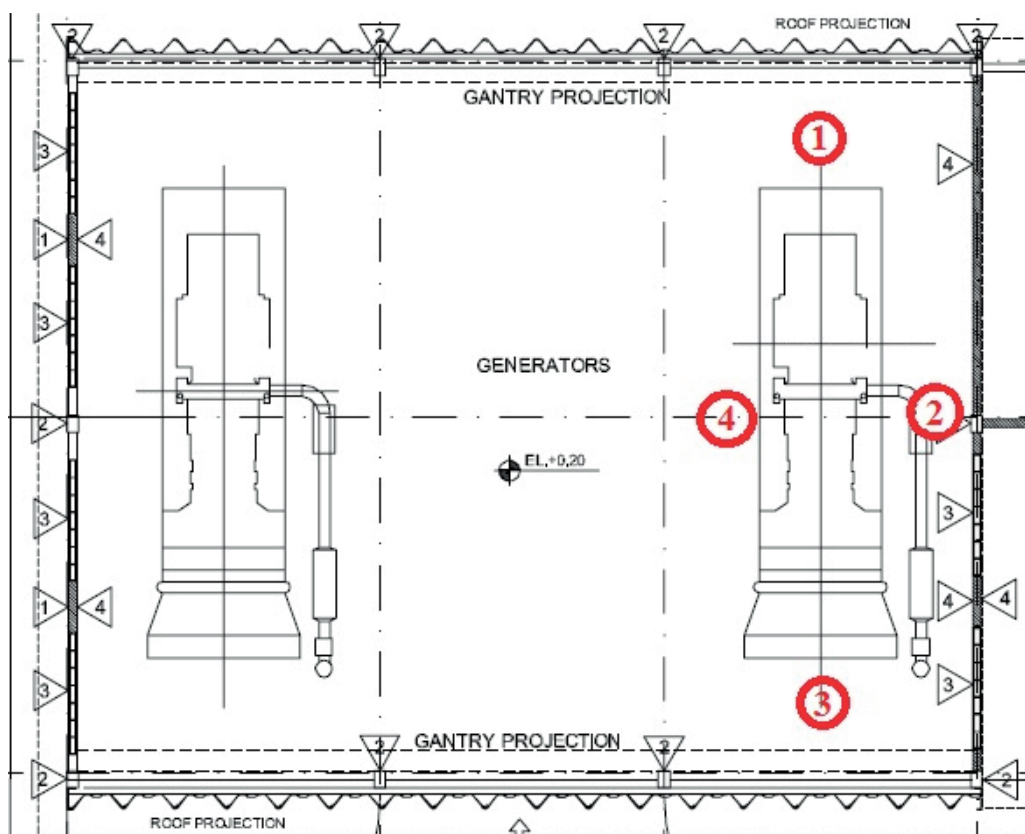


Fig. 6. Área de geradores.

Tabela 4. Dados aferidos na área de geradores.

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição à fonte	3 minutos
Nível máximo de ruído - Área 1	87,30 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 2	88,70 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 3	88,00 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 4	87,00 dB SPL
Nível médio de ruído (L_{avg})	86,31 dB SPL

3.3.3. Área das turbinas

A demanda operacional na hora da medição requeria a operação de apenas a turbina "C". Portanto, a medição foi tomada na periferia desta turbo máquina, como ilustrado na Fig. 7. Os locais de medição estão indicados em vermelho. Na Tabela 5, constam os dados aferidos em campo.

A Tabela 5 retrata o cenário mais ruidoso dentre os três analisados. Nota-se que os valores máximos aquisitados estão em torno de 100 dB SPL, levando o nível médio (L_{avg}) à 97,17dB SPL, ou seja, 17,17dB SPL acima do valor de referência.

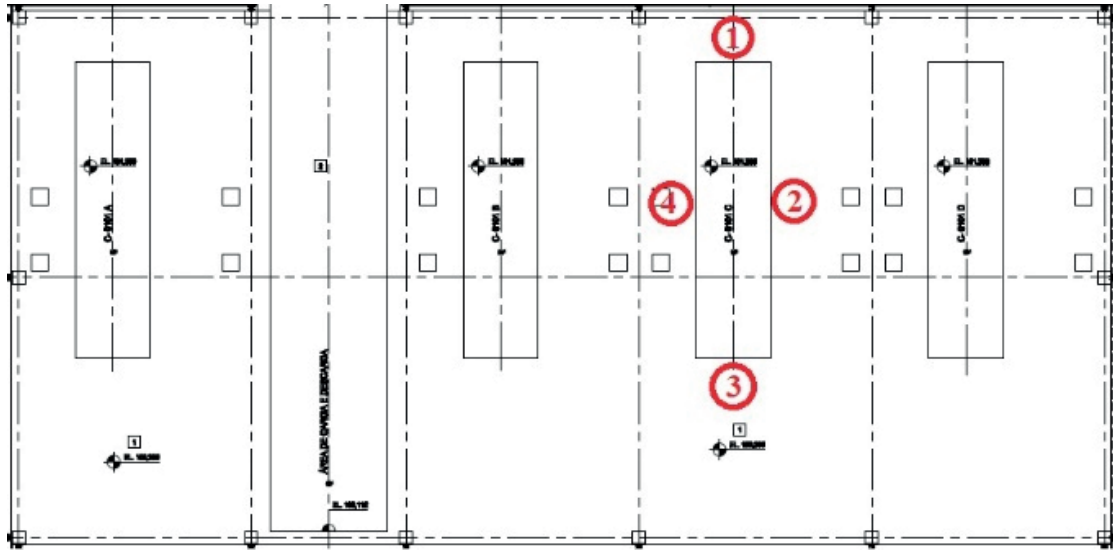


Fig. 7. Área das turbinas.

Tabela 5. Dados Aferidos na área das turbinas.

Parâmetro	Valor
Tempo de exposição à fonte	6 minutos
Nível máximo de ruído - Área 1	101,20 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 2	99,50 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 3	100,50 dB SPL
Nível máximo de ruído - Área 4	101,00 dB SPL
Nível médio de ruído (L_{avg})	97,17 dB SPL

3.4. Sistema implementado

Definidos os parâmetros de taxa de aprendizagem μ e do comprimento do filtro M , o primeiro passo do algoritmo é a obtenção da estimativa do caminho secundário. O sistema é programado para gerar um ruído aleatório, de aproximadamente 3,75 segundos e o emitir. O sensor de erro (microfone) capta esse sinal e, utilizando o algoritmo NLMS, estima a função de transferência do caminho secundário.

A Fig. 8 apresenta o resultado da estimativa de um caminho secundário aleatório, simulado pelo programa de cálculo científico *Matlab*®. A taxa de aprendizagem μ e do comprimento do filtro M , do algoritmo NLMS, foram definidos como: $\mu=0.3$ e $M=550$.

O resultado apresentado na Fig. 8, traz um comparativo entre a resposta do caminho secundário real (em azul), em relação ao sinal de 3,75 segundos emitido. Pode-se observar também o sinal de erro (em vermelho), que explicita a diferença entre os dois sinais citados anteriormente. Nota-se a redução do sinal de erro, conforme adaptação do filtro NLMS, estabilizando em torno de 0,8 s. Portanto, esse é o tempo necessário ao algoritmo para estimar o caminho secundário.

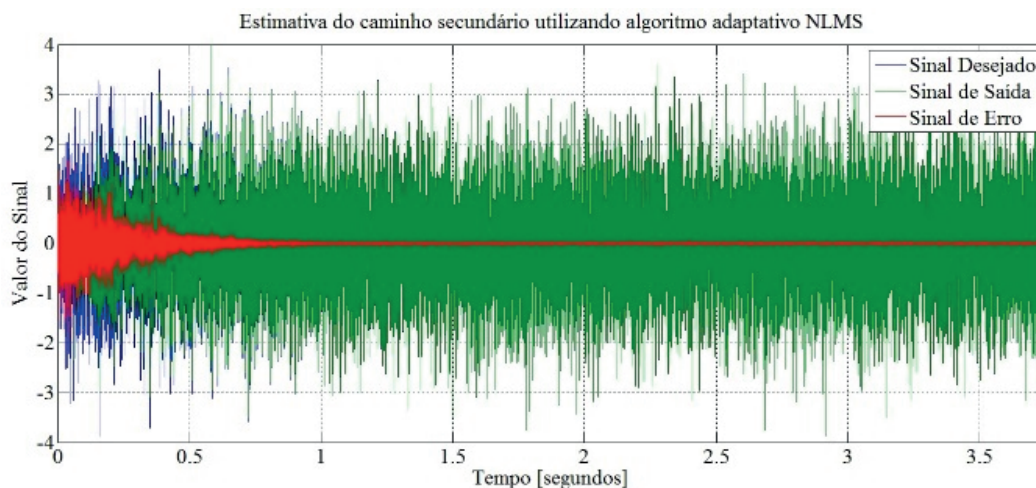


Fig. 8. Estimativa do caminho secundário.

O caminho primário representado na Fig. 3 é aproximado através de um filtro linear. Esse modelo é usado apenas na simulação do sistema, de maneira a aproximar o modelo ao sistema real. Com as estimativas realizadas, segue-se à implementação do filtro F-XLMS.

Na topologia apresentada na Fig. 4, o sinal gravado em campo é filtrado pela estimativa do caminho secundário. O sinal resultante e o sinal de erro são as referências para as adaptações iterativas do filtro, que são regidas pelo algoritmo F-XLMS. Tendo atravessado o filtro, o sinal passa pelo caminho secundário real e o sinal antirruído é emitido.

O antirruído é emitido pela fonte secundária e é superposto ao sinal o qual se deseja atenuar. Porém, o ruído ao qual o antirruído é superposto, não é o original captado na fonte mas, sim, um sinal que apresenta alterações inerentes ao percurso de propagação [12]. Portanto, no sistema simulado o caminho primário também é modelado por um filtro linear.

Ocorrida a superposição, o sensor de erro (microfone) capta o sinal resultante e realimenta o algoritmo adaptativo, que otimiza os coeficientes do filtro, de modo a minimizar o sinal de erro.

O sistema simulado traz como particularidade a implementação de um novo bloco na topologia de controle, que é o modelo de estimativa do caminho primário, conforme destacado em vermelho na Fig. 9.

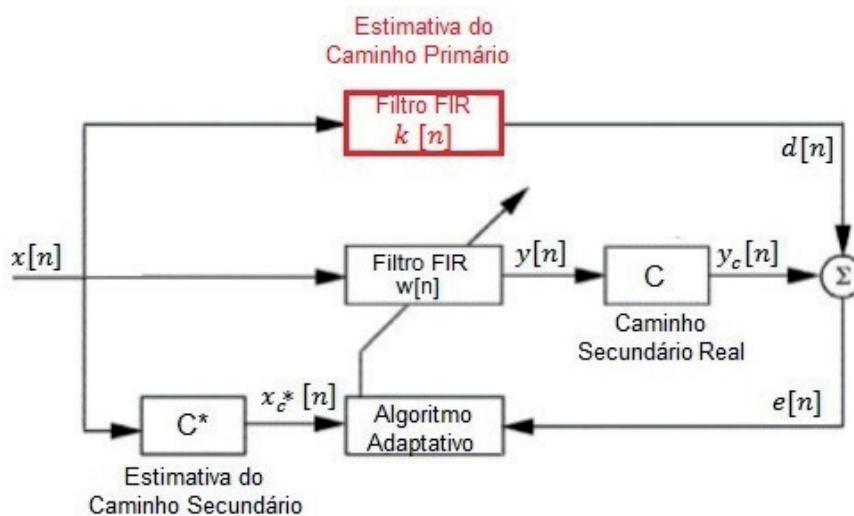


Fig. 9. Sistema implementado para simulação.

A Tabela 5 retrata o cenário mais ruidoso dentre os três analisados. Nota-se que os valores máximos aquisitados estão em torno de 100 dB SPL, levando o nível médio (Lavg) à 97,17dB SPL, ou seja, 17,17dB SPL acima do valor de referência.

4. RESULTADOS

4.1. Área dos compressores de ar ($M=350$ e $\mu=0.0006$)

Nas Figuras 10 e 11 estão apresentadas em valores absolutos a relação entre o sinal original (ruído), o antirruído e o ruído residual (erro) na área dos compressores de ar. Observa-se que o ruído resultante apresenta uma atenuação relevante em relação ao ruído original. A capacidade de adaptação do algoritmo é nitidamente observada nos momentos de maior variação do sinal, a qual ocorre entre aproximadamente 2 e 5 segundos. É notório um aumento imediato do erro quando das variações mais abruptas do sinal, porém o algoritmo responde tendendo a minimizá-lo novamente.

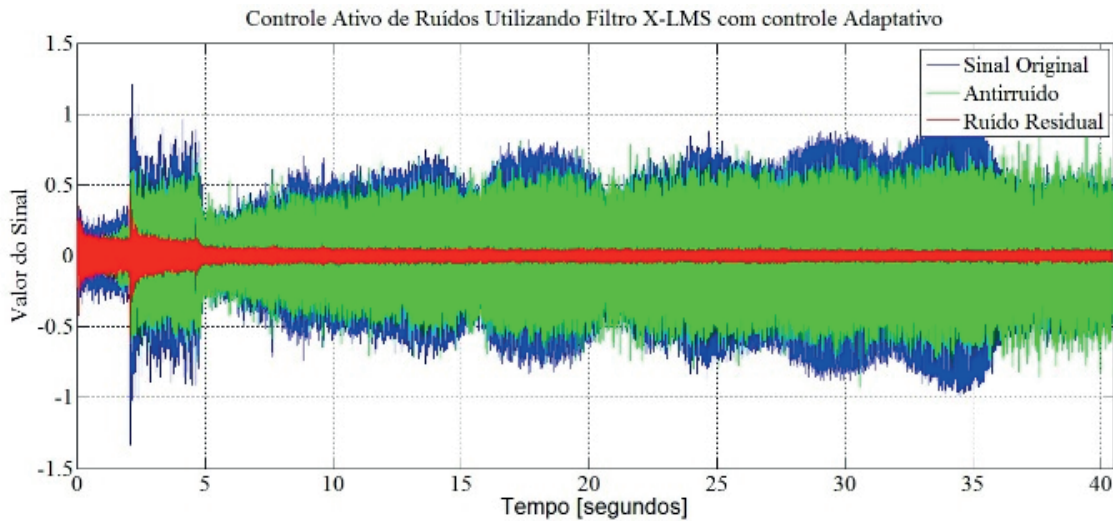


Fig. 10. Áreas dos compressores de ar – Relação sinal original x antirruído x sinal residual.

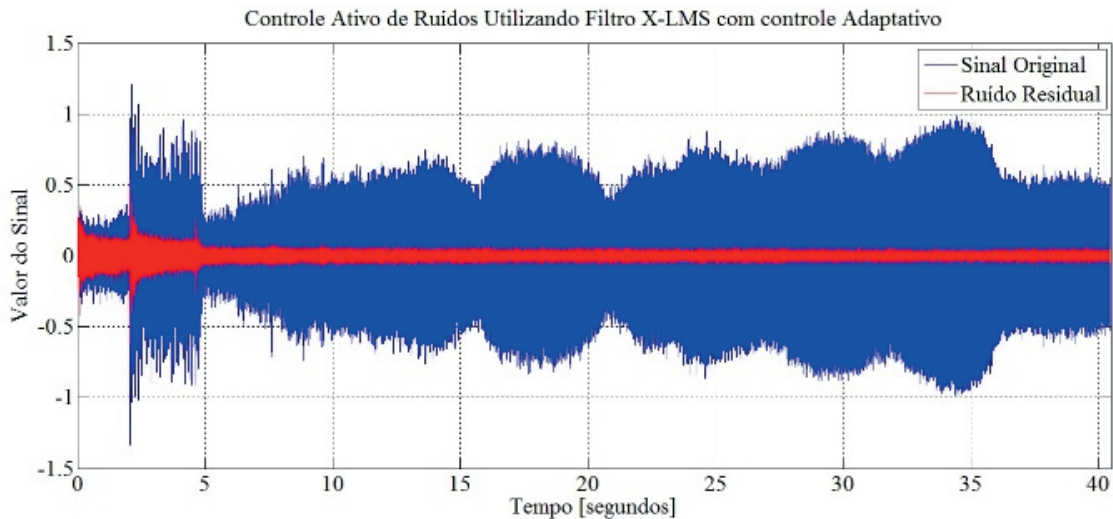


Fig. 11. Área dos compressores de ar – Relação sinal original x sinal residual (erro).

A Fig. 12 apresenta os espectrogramas dos sinais (original e atenuado) da área de compressores de ar ao longo do tempo. É perceptível a redução da concentração de energia do espectro no sinal atenuado, em comparação ao sinal original. Tal característica é observada pela menor concentração da tonalidade vermelha e uma maior concentração da tonalidade verde no espectro do sinal atenuado. Observa-se também que a atenuação do sinal não é concentrada numa faixa contínua ou exclusiva de frequência, esta acontece em todo espectro, característica inerente à adaptabilidade do sistema. É evidenciado o momento de variação do sinal, explicitando os momentos em que o algoritmo é mais exigido, na tentativa de estabilização do sinal de erro.

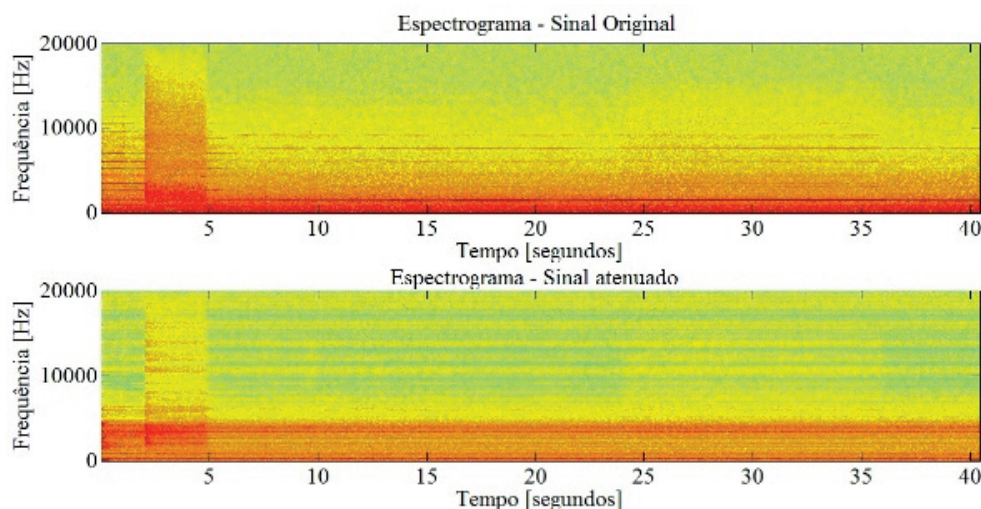


Fig. 12. Área dos compressores de ar – Espectrograma.

Na Fig. 13, tem-se uma percepção mais adequada quanto ao campo sonoro atenuado da área de compressores de ar, dado que sua representação é feita em dB. Nota-se que na faixa das médias e baixas frequências (entre 1,0 e 3,5 kHz) o sistema apresentou o melhor resultado, chegando a atenuações de aproximadamente 30 dB. Em frequências superiores também são observados alguns pontos distintos de atenuação. Entretanto, a concentração do espectro do sinal original encontra-se entre 0 e 5kHz, portanto, essa é a faixa de maior interesse.

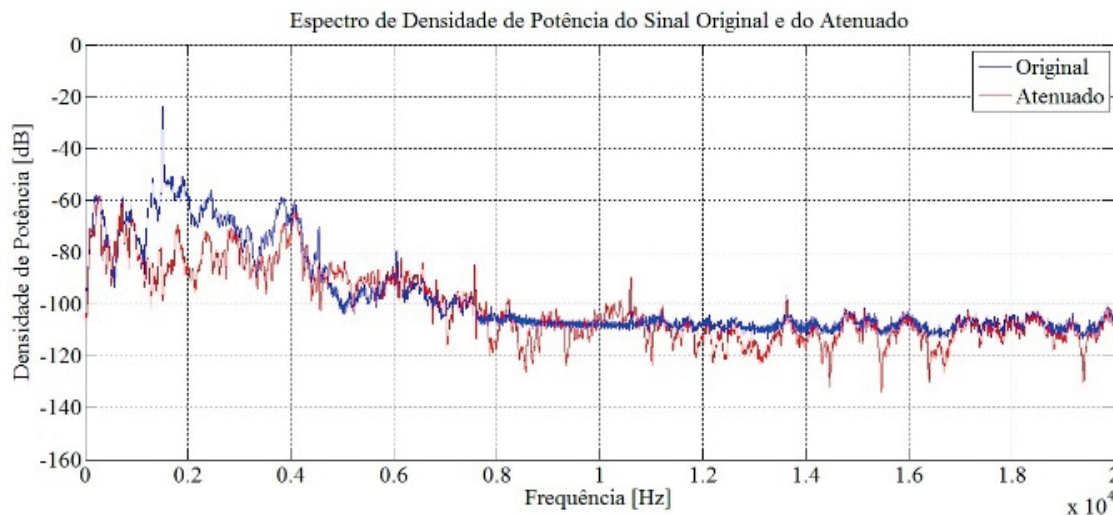


Fig. 13. Área dos compressores de ar – Espectro de densidade de potências dos sinais.

4.2. Área de geradores ($M=1200$ e $\mu=0.0009$)

Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas em valores absolutos a relação entre o sinal original (ruído), o antirruído e o ruído residual (erro) da área de geradores. Nota-se que o ruído resultante apresenta uma atenuação relevante em relação ao ruído original, tal como no ambiente descrito anteriormente. A convergência do ruído residual (erro) ocorre num curto espaço de tempo, mantendo-se estável durante o restante do período.

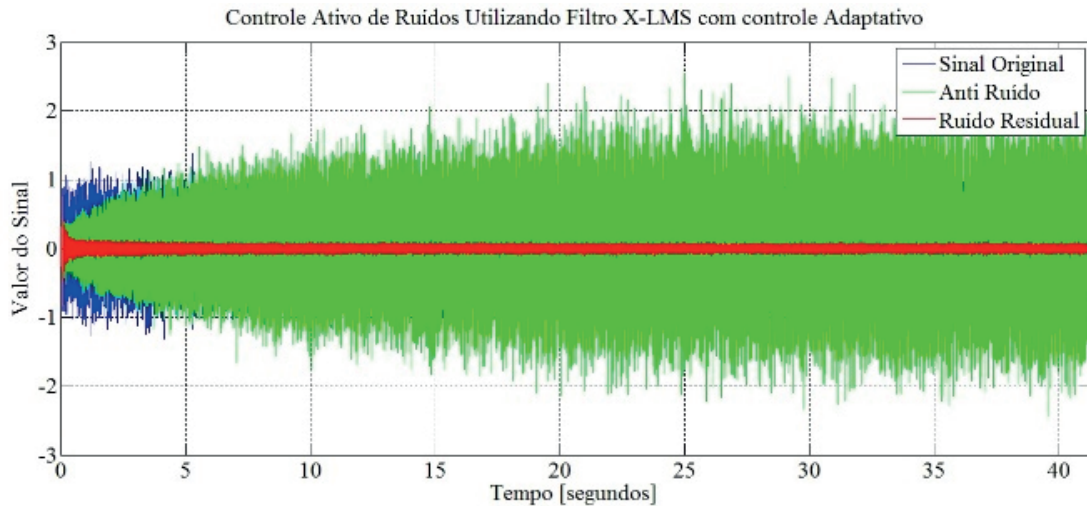


Fig. 14. Área de geradores – Relação sinal original x antirruído x sinal residual (erro).

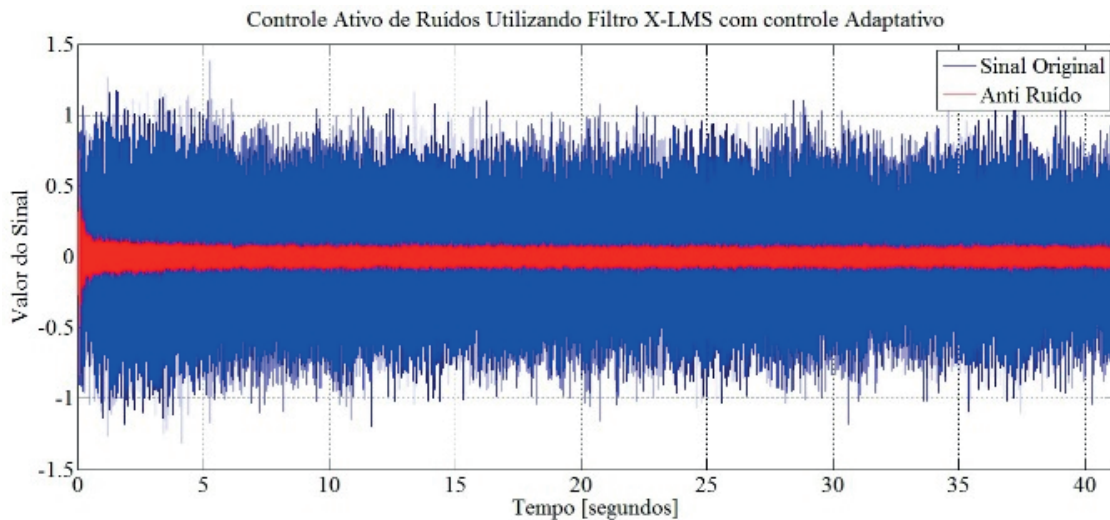


Fig. 15. Área dos compressores de ar – Espectro de densidade de potências dos sinais.

Na Fig. 16 tem-se o comparativo entre os espectros do sinal original e do sinal atenuado na área de geradores. O espectro do sinal atenuado apresenta forte redução nas faixas onde ocorrem as maiores concentrações de energia do sinal original. Portanto, o algoritmo manteve a sua eficácia nas faixas de maior concentração do espectro de 0 à 5 kHz, porém mantendo sua ação em faixas superiores de frequência.

A Fig. 17 apresenta a atenuação do campo sonoro, comparando o sinal original e o atenuado. Observa-se que o método obteve resultados mais significativos entre 1,5 e 4 kHz, porém na faixa de 2 kHz obteve seu melhor ponto de desempenho, chegando a 50 dB de atenuação. Entretanto, em alguns pontos do espectro foram observadas amplificações do sinal. Essas amplificações ocorreram em pontos de menor densidade de potência no espectro, portanto, não representam problemas quanto a implementação prática.

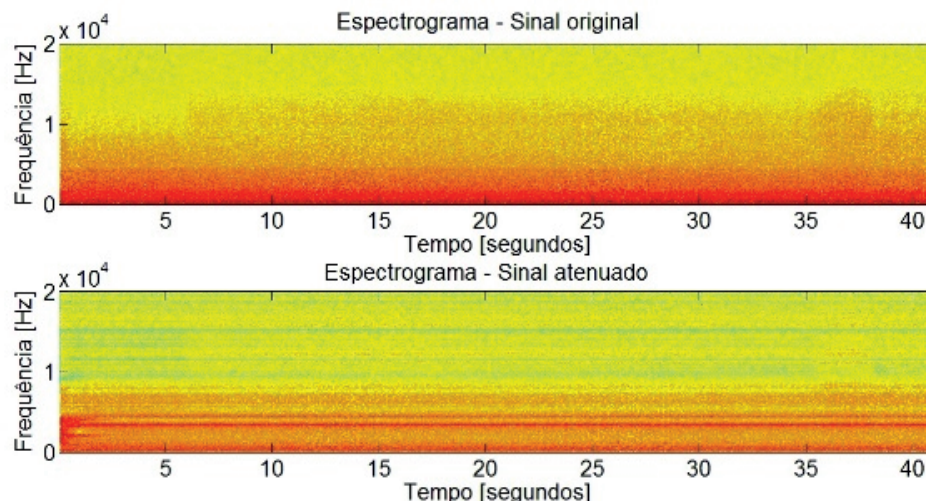


Fig. 16. Área de geradores – Espectrograma.

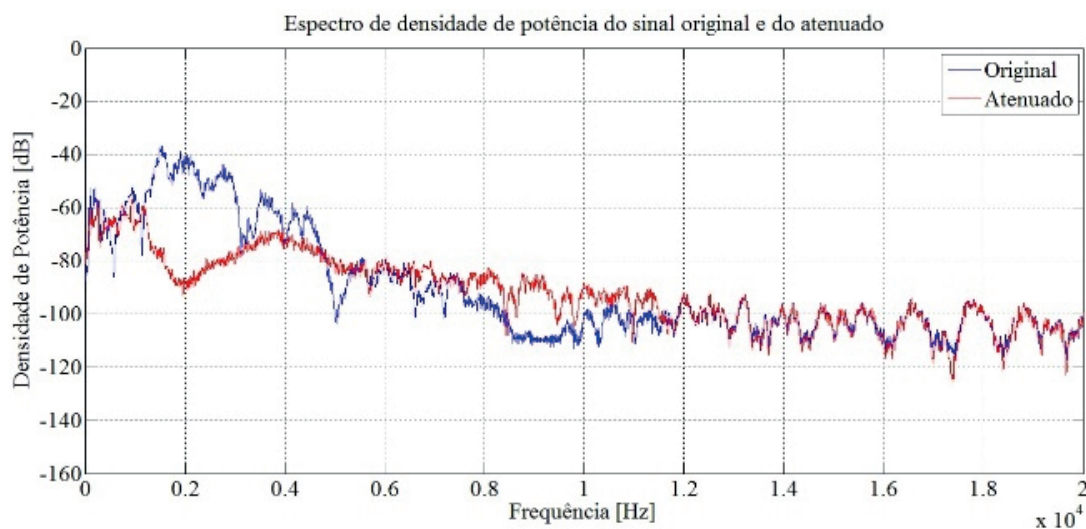


Fig. 17. Área de geradores – Espectro de densidade de potências dos sinais.

4.3. Área das turbinas ($M=850$ e $\mu=0.00012$)

Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas em valores absolutos a relação entre o sinal original (ruído), o antirruído e o ruído residual (erro) na área das turbinas. O sistema de controle ativo mantém uma eficácia satisfatória, porém é nítido que a relação entre o sinal original e o ruído residual é maior que nos ambientes anteriores. Esse fato é justificado pela característica de maior variação do sinal da turbina. Apesar do sinal do erro ser mantido dentro de uma faixa de controle, são observadas variações maiores em seu valor quando comparado aos ambientes anteriormente tratados.

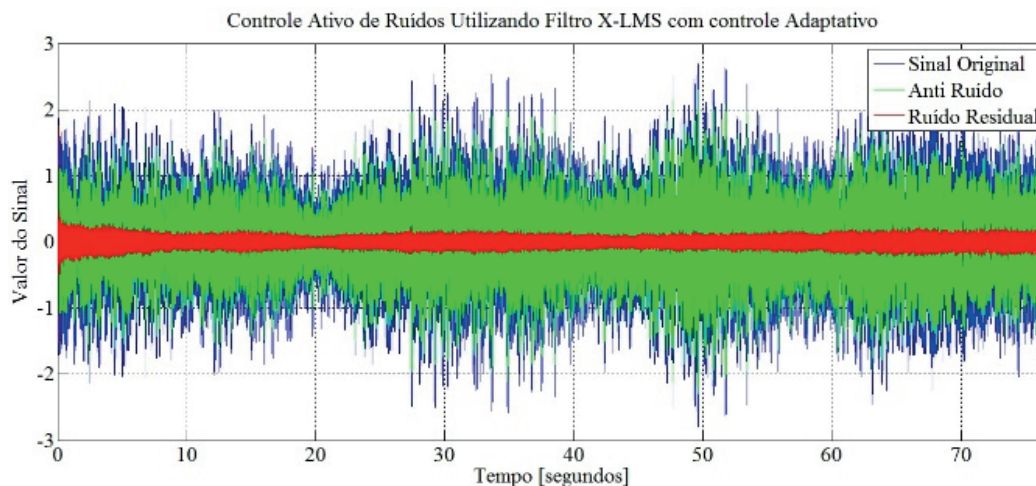


Fig. 18. Área das turbinas – Relação sinal original x antirruído x sinal residual (erro).

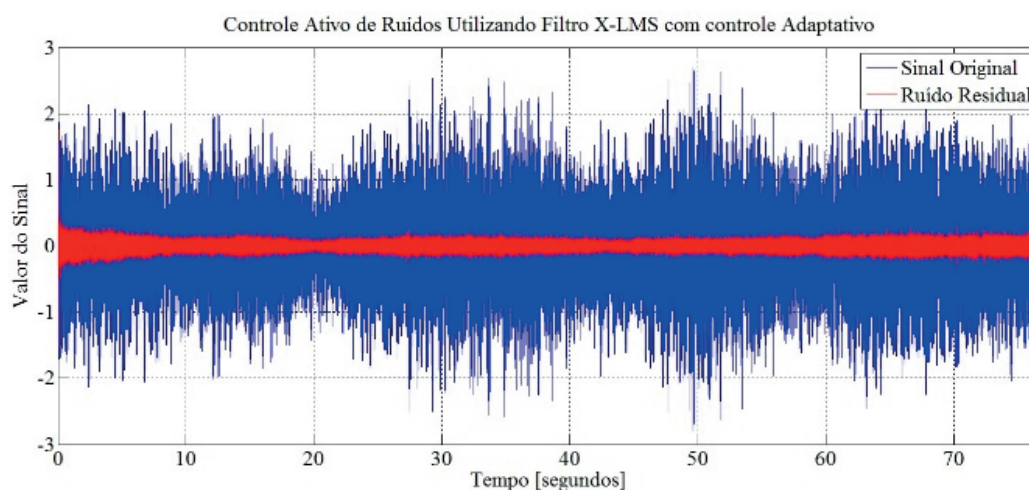


Fig. 19. Área das turbinas – Relação sinal original x sinal residual (Erro).

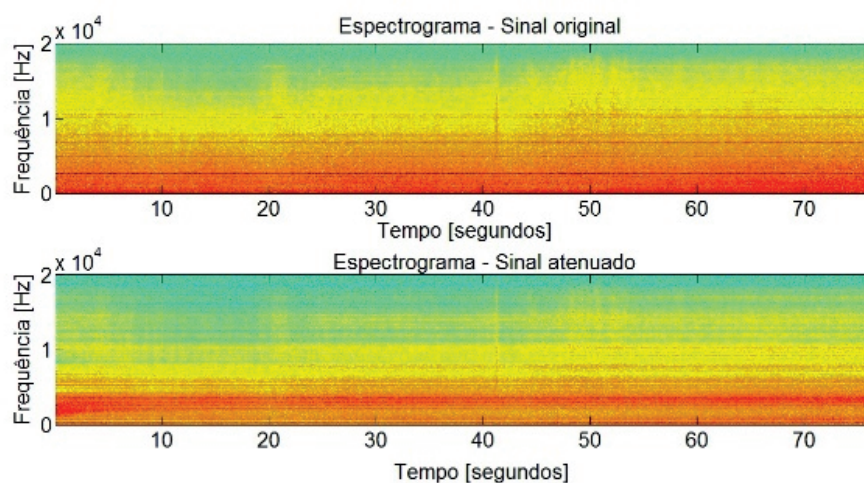


Fig. 20. Área das turbinas – Espectrograma.

Na Fig. 20, tem-se o comparativo temporal dos os espectros do sinal original e do sinal atenuado na área das turbinas. Mais uma vez observam-se faixas de frequência distintas com uma notória redução da

concentração de energia. Porém percebe-se uma ação maior do algoritmo em altas frequências. Essa maior atuação é justificada pelo fato de o espectro da área das turbinas apresentar uma concentração maior de energia em faixas de alta frequência, quando comparado aos outros ambientes.

A Fig. 21 apresenta uma comparação entre o espectro dos sinais com valores em dB, evidenciando o campo sonoro atenuado na área das turbinas. Nesse comparativo observa-se que o sinal atenuado apresentou uma redução máxima de aproximadamente 30dB entre 2 e 4kHz e, apesar do comportamento satisfatório, sua influência foi menor nas faixas de média e baixa frequências, quando comparado aos ambientes anteriores. Porém percebe-se uma atuação maior do algoritmo quando analisadas as frequências acima de 8kHz, apresentado uma maior quantidade de pontos de atenuação.

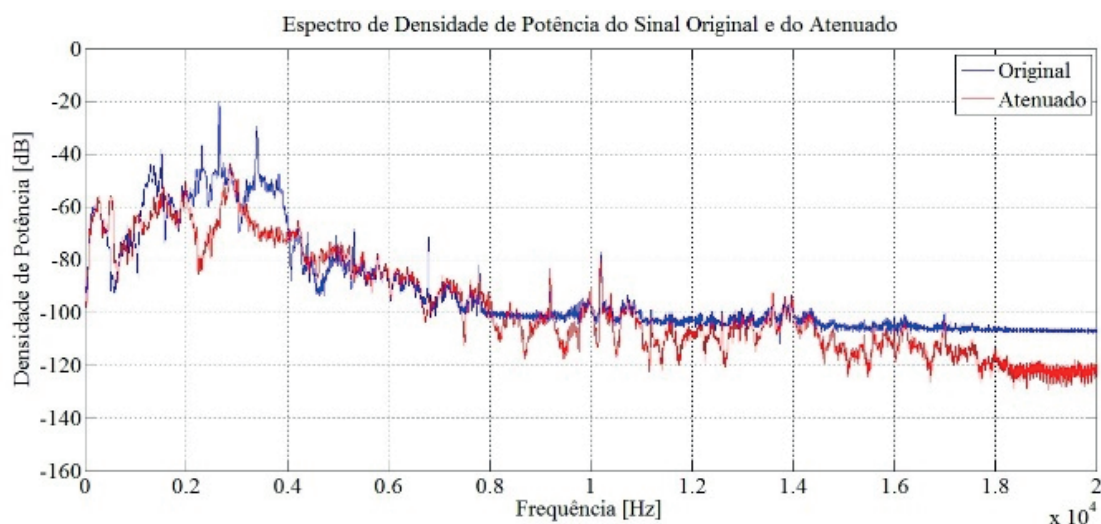


Fig. 21. Área das turbinas – Espectrograma.

4.4. Comutação entre ambientes ($M=800$ e $\mu=0.00009$)

Neste cenário, foi efetuada a tentativa de simular uma condição extrema, a qual seria a mudança abrupta de ambientes. Tal simulação seria uma tentativa de adequar os valores da taxa de aprendizagem μ e o comprimento do filtro M , de maneira que o algoritmo atendesse aos três cenários em análise.

Foi feita uma montagem através do software Audacity®, no qual foram inseridos sequencialmente trechos com duração de 15 segundos originários de cada um dos cenários, ocorrendo comutações instantâneas entre os mesmos, sendo o arquivo resultante submetido ao algoritmo de controle ativo. Os parâmetros utilizados foram: $M = 800$ e $\mu = 0.00009$ e as comutações entre os ambientes ocorrem exatamente em 15 e 30 segundos.

As Figuras 22 e 23 apresentam a relação entre o sinal original, o antirruído e o ruído residual, da comutação entre ambientes. A resposta do sistema de controle ativo, após a estabilização do controle, mostra-se satisfatória, no que diz respeito ao valor absoluto de atenuação. Porém, é importante destacar a necessidade de um tempo maior para convergência do sinal de erro no momento inicial do sistema, algo em torno de 5 segundos, tempo esse longo quando comparado aos ambientes em separado. Esse tempo maior é justificado pela necessidade de uma taxa de aprendizagem menor μ , quando comparado aos ambientes em separado. Tal necessidade se dá pelas características de maior variação do sinal, principalmente nos pontos de transição do sistema (em 15 e 30 segundos exatamente). É importante observar também que apesar da necessidade de um tempo maior de convergência nos momentos iniciais da aplicação, nos momentos de transição a influência da variação de ambientes no sinal de erro foi muito menor.

Na Fig. 24, tem-se o comparativo ao longo do tempo entre os espectrogramas do sinal original e do sinal atenuado na área de comutação entre os ambientes. É evidenciado nos primeiros 5 segundos da aplicação a baixa eficiência do sistema na redução da densidade do espectro, conforme já justificado na figura anterior.

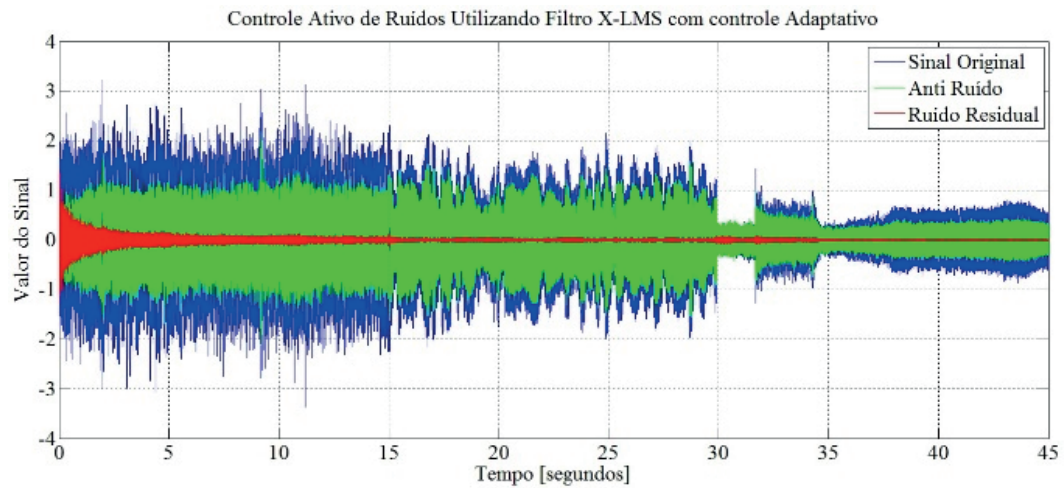


Fig. 22. Comutação entre ambientes – Relação sinal original x antirruído x sinal residual (erro).

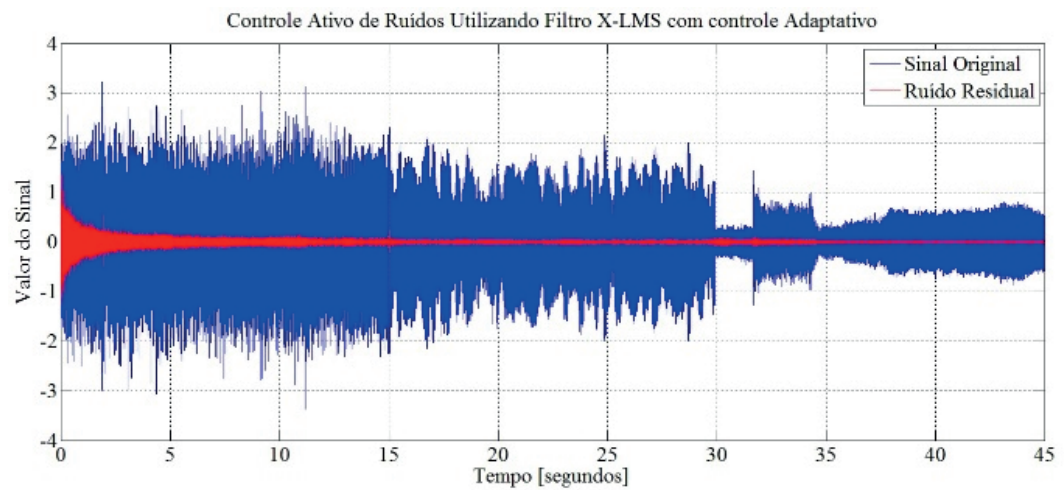


Fig. 23. Comutação entre ambientes – Relação sinal original x sinal residual (erro).

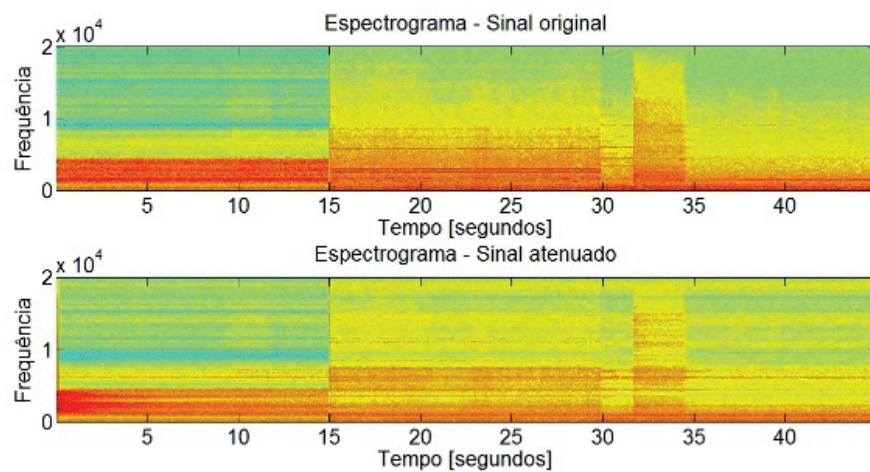


Fig. 24. Comutação entre ambientes – Espectrograma.

Porém, a partir da estabilização do controle, o sistema demonstra mais uma vez seu potencial de controle agindo sobre o espectro do sinal, nos pontos de maior concentração de frequência.

Na Fig. 25, é apresentada a comparação entre o espectro dos sinais com valores em dB, evidenciando o campo sonoro atenuado na área de comutação entre ambientes. Neste aspecto, é evidenciada a atuação do sistema numa faixa maior de frequência do que nas áreas anteriores analisadas. O sistema consegue uma atenuação máxima de 50 dB, no entanto, mantém esse fator de atenuação alto entre a faixa de 1,5 e 4 kHz, ou seja, numa faixa relativamente extensa de frequências.

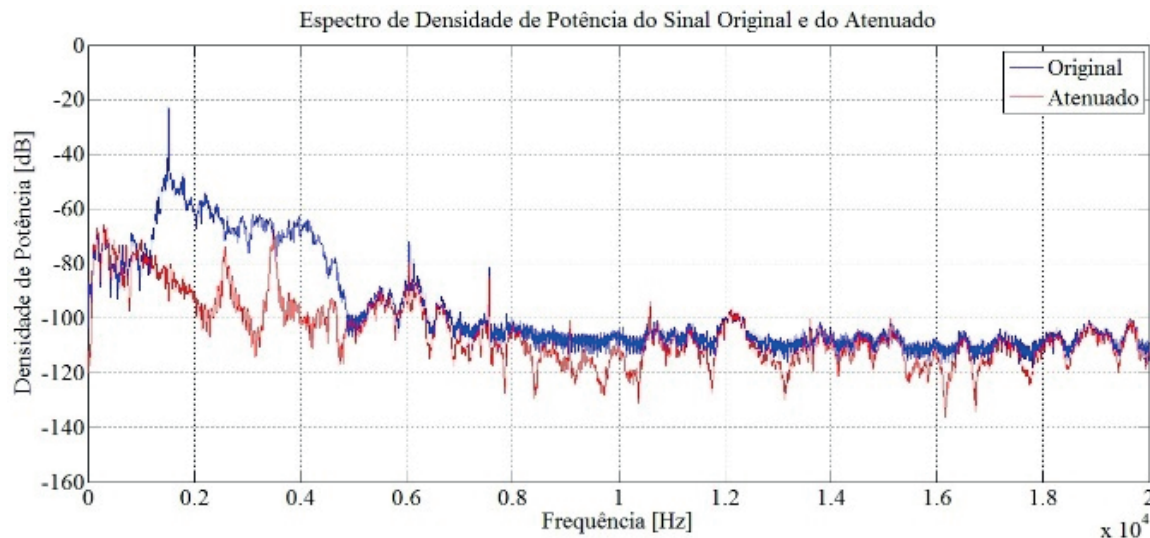


Fig. 25. Comutação entre ambientes - Espectro de densidade de potências dos sinais.

Apesar da simplicidade do sistema, ou seja, apenas com um sensor de erro e uma fonte secundária, é notória a eficiência do método de controle, buscando a convergência do sinal de erro, até que o mesmo atinja a condição determinada como ótima pelo algoritmo.

É importante destacar que nos três cenários, quando tratados separadamente, foram obtidos resultados satisfatórios tanto nos valores atenuados quanto no tempo de convergência do sinal de controle, levando o erro para próximo de zero. Porém, para tal, cada cenário demandou parâmetros diferentes de entrada para um resultado otimizado.

Quando implementado o sistema de controle no cenário extremo, ou seja, na comutação entre os ambientes, o sistema apresentou um resultado satisfatório quanto ao valor final do ruído residual. Porém, ocorreu um incremento considerável no tempo para convergência do mesmo, algo em torno de 5 segundos, reforçando a tese de que cada ambiente demanda um estudo e tratamento específico.

Considerando este tempo de convergência, seria necessário um estudo mais aprofundado para estimativa de quanto tempo o operador passaria por esta situação para, numa contabilização diária, verificar se o tempo de exposição extrema, durante esta convergência, estaria adequado às normas de tempo máximo de exposição ao ruído.

Quando analisada a variação do espectro de frequências ao longo do tempo, nota-se a atenuação nas faixas onde existe maior densidade espectral de sinal, mostrando uma redução da tonalidade vermelha ao longo do tempo no espectro.

Outro destaque a ser mencionado são os espectros de densidade de potência, que apresentam atenuação na faixa de 50dB em determinadas faixas de frequência. É perceptível que a atenuação do sistema se concentra onde há maior densidade de potência do sinal, indicando uma maior influência do método. Ainda no espectro de densidade de potência, no ambiente da área de geradores, é perceptível que em algumas faixas de frequências ocorre uma amplificação do sinal, contrário ao comportamento desejado, porém como ocorrem em faixas de frequências onde a densidade é muito reduzida, a influência torna-se desprezível no

resultado final. Tal fenômeno pode ocorrer tanto pelo comportamento do algoritmo, quanto por características no ambiente de aplicação, causando superposição de sinais de mesma fase.

É importante destacar que em todos os cenários analisados, os resultados obtidos mostram uma atenuação de todo o sinal tratado, ou seja, a aplicação direta do sistema de controle ativo no sinal composto pelo ruído e a voz humana não foi capaz de fazer a distinção dos dois, atenuando além do ruído, também o sinal de voz.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nas simulações do sistema de controle ativo de ruído proposto retratam o grande potencial da ferramenta utilizada, o algoritmo F-XLMS, para emprego em ambientes industriais. No entanto, apesar de ter se mostrado plausível nos cenários analisados em ambiente computacional, é evidente que o sistema ainda necessita de melhorias para implementação num cenário real. Como exemplo, cita-se a expansão do algoritmo para utilização de mais sensores de monitoramento e fontes secundárias, que tende a melhorar a eficácia do método.

A opção do controle ativo para implementação nos cenários analisados veio da necessidade de comunicação entre os operadores locais da estação de compressão. No entanto, foi evidenciado durante as simulações que a aplicação direta do método aos sinais captados, da voz humana, juntamente com o ruído a ser atenuado, não foi eficaz na atenuação apenas do ruído.

O fato de a voz humana ter seu espectro de frequência concentrado na mesma faixa dos ruídos os quais deseja-se atenuar, fez com que o algoritmo não fosse capaz de atenuar apenas os ruídos. Foram atenuadas todas as frequências presentes no sinal, inclusive da voz humana. Logo, faz-se necessário o estudo de métodos que possibilitem a separação da voz humana do sinal a ser atenuado. Uma sugestão seria a aplicação de um algoritmo de separação de fontes antes da execução controle ativo, porém tornaria o sistema mais complexo. Outra solução mais simples seria minimizar a potência do sinal da voz que chega aos sensores do sistema, tornando sua influência mínima no sistema de controle ativo.

Vale ressaltar que o sistema proposto não demanda barreiras físicas para o isolamento do usuário, como no controle passivo. Portanto, elimina a necessidade de utilização do protetor auricular do tipo concha, aliviando o operador deste equipamento incômodo. Com a ferramenta de controle ativo e o avanço no desenvolvimento de circuitos integrados, a implementação do sistema deve ser direcionada para fones de ouvido de tamanhos reduzidos, melhorando a ergonomia do usuário.

Já é um fato conhecido na literatura, porém foi evidenciado nas simulações que a variação dos parâmetros M e μ ocorre de acordo com as características do ruído e do ambiente, sendo esses parâmetros inseridos manualmente. Métodos de análise utilizando sistemas inteligentes (como redes neurais, por exemplo) podem ser avaliados em trabalhos futuros, de modo que o sistema tenha a auto adequação ao ambiente, trazendo avanços ainda mais significativos, garantindo-se o bem estar e a segurança operacional dos operadores.

REFERÊNCIAS

- [1] Sathler, C.S.F., *Controle Ativo de Ruído*, Universidade Federal do Paraná (2009)
- [2] Saúde, M.d., "Perda Auditiva Introduzida por Ruído (PAIR) - Saúde do Trabalhador Protocolos de Complexidade Diferenciada," Brasília (2006)
- [3] Bistafa, S.R., *Acústica aplicada ao controle do ruído*, São Paulo: Blucher (2018)
- [4] Snyder, S.D., Hansen, C.H., "The effect of transfer function estimation errors on the filtered-x LMS algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, **42**(4), 950-953 (1994)
- [5] Elliott, S.J., Nelson, P.A., "Active noise control," *IEEE signal processing magazine*, **10**(4), 12-35 (1993)
- [6] Lueg, P., "Process of silencing sound oscillations", U.S. Patent 2,043,416 (1936)

- [7] Bies, D.A., Hansen, C.H., *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, New Fetter Lane: Spon Press (2003)
- [8] Almeida, N.U., *O controle do ruído ambiental em empresas da Cidade Industrial de Curitiba*, Curitiba: Universidade Federal do Paraná (2008)
- [9] Simon, H., Barry, V.V., *Sinais e Sistemas*, Porto Alegre: Bookman (2001)
- [10] Haykin, S., *Neural networks: a comprehensive foundation*, Upper Saddle River: Prentice Hall PTR (1994)
- [11] Simpson, M.T., Hansen, C.H., "Use of genetic algorithms to optimize vibration actuator placement for active control of harmonic interior noise in a cylinder with floor structure," *Noise Control Engineering Journal*, **44**(4), 169-184 (1996)
- [12] Kuo, S.M., Morgan, D.R., "Active noise control: a tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, **87**(6), 943-973 (1999)
- [13] Mathworks, "<https://www.mathworks.com/help/audio/examples/active-noise-control-using-a-filtered-x-lms-fir-adaptive-filter.html>," Mathworks, 24 Fevereiro 2016. [Online].
- [14] Brasil, "Normas regulamentadoras: NR-15-atividades e operações insalubres," Diário Oficial da União, (1978)
- [15] NBR, "10.152: Níveis de Ruído para Conforto Acústico," ABNT, Rio de Janeiro (1987)
- [16] Instrutherm, "Manual de instruções, Dosímetro pessoal de ruído com RS-232 e datalogger modelo DOS-500," Instrutherm _ Instrumentos de Medição Ltda (2016)
- [17] Bies, D.H., Hansen, C.H., Campbell, R.H., "Engineering Noise Control," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1279 (1996)

ACTIVE NOISE CONTROL APPLIED TO A GAS COMPRESSION STATION

Abstract – Based on the concept of active noise control, which uses the destructive superposition of signals to cancel unwanted noise, this work presents the computer simulation of a system for noise suppression in an industrial environment, taking measurements as a starting point in a Gas Compression Station. The algorithm implemented for noise reduction is based on the theory of adaptive filters, applying filters with variable coefficients adapted by a specific algorithm, in order to obtain an adequate response. The method is explored in order to verify its effectiveness in attenuating specific noises, characteristic of the environment under analysis, aiming to allow communication between people in environments with high noise levels. The analyzed signals were acquired in the field to better represent the results. The results achieved prove the possibility of applying the proposed technique for noise suppression, although they highlight the difficulty in effectively filtering the voice signals in the studied environment.

Keywords – Active noise control, Adaptive filters, Gas compression station.



MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN TRACTORES AGRÍCOLAS. PROPUESTA DE METODOLOGÍA ORIENTADA AL MANTENIMIENTO CONECTADO

CARLOS MAFLA¹, CRISTINA CASTEJON², HIGINIO RUBIO²

¹Universidad Técnica del Norte
Departamento de Ingeniería Automotriz
Av. 17 de julio, 5-21, 100150, Ibarra, Imbabura, Ecuador

²Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica
Av. De la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España

(Recibido 3 de marzo de 2022, para publicación 3 de abril de 2022)

Resumen – Las técnicas de mantenimiento predictivo, y en particular las basadas en la condición (*Condition Monitoring*) están cobrando gran interés dentro de la gestión de mantenimiento por su interacción con los pilares del paradigma Industria 4.0 que se están integrando en la industria. El predecir fallos antes de que estos ocurran es una de las ventajas más importantes de esta técnica que permite evitar paradas inesperadas y reduce los costos de mantenimiento y operación. El objetivo de este estudio es dar a conocer las técnicas asociadas a la implementación de un mantenimiento predictivo en tractores agrícolas y las ventajas que estas podrían generar. Para ello, en este trabajo se detallan, además de las averías comunes de los motores de vehículos agrícolas y los fallos de mayor frecuencia, la metodología para implantar un sistema de mantenimiento predictivo en los elementos críticos de un vehículo agrícola.

Palabras clave – Vehículo agrícola, mantenimiento predictivo, averías en tractores, Industria 4.0, monitorización basada en la condición.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento es el conjunto de actividades que tratan de subsanar la degradación o fallo que se produce, por el tiempo y el uso en una máquina o equipo con el fin de garantizar su normal funcionamiento. Este conjunto de actividades es de vital importancia en la industria, pues garantiza la calidad en los procesos y productos. Así, la misión del departamento de mantenimiento es la de asegurar disponibilidad, fiabilidad, vida útil y costo de mantenimiento. La optimización y mejora de dichas operaciones permite reducir costes garantizando el buen funcionamiento de la máquina. En este sentido el mantenimiento tradicional vincula diferentes estrategias (correctivo, preventivo y predictivo). Estas estrategias se fundamentan en la determinación de la probabilidad de ocurrencia de fallos empleando herramientas de análisis, listas de chequeo y programación de tareas, sin embargo, no muestra cómo llegar a ellas y se sostiene en escasas variables [1]. De ahí el interés de incorporar de manera extensiva las técnicas de mantenimiento predictivo, gracias a la incorporación de tecnologías IoT (del inglés *Internet of things* / internet de las cosas) en la industria.

El mantenimiento en la industria evoluciona constantemente introduciendo en sus procesos nuevos equipos y sensores para la medida y el control más económicos y eficientes gracias al rápido desarrollo de la electrónica y las comunicaciones. Con esto se logra tener datos en tiempo real y monitorear el estado de las máquinas o equipos, siendo las técnicas utilizadas para ello: análisis de vibraciones, termografía infrarroja, baroscopio, análisis de aceites, emisión acústica, humos de combustión, entre otros.

El mantenimiento predictivo tiene como misión predecir fallos en los componentes de la maquinaria, con el objetivo de reemplazar o reparar el elemento deteriorado antes que este provoque una falla colectiva y la

máquina requiera de una tarea de mantenimiento correctivo, con las consecuencias de pérdida de productividad que lleva la parada imprevista de la máquina.

El mantenimiento predictivo instituye procedimientos y considera información de daños históricos establecidos a partir de relaciones de una determinada variable y la vida útil del componente. Se logra esa información adquiriendo datos de ciertos parámetros representativos del estado del elemento en intervalos predeterminados periódicamente hasta que dicho elemento presenta un fallo.

Dentro de este ámbito, este trabajo se centra en el mantenimiento eficiente de maquinaria agrícola. El tractor es la fuente de energía móvil y versátil más importante con que se cuenta actualmente para la producción comercial en el área agropecuaria y forestal [2]. Este vehículo agrícola se desplaza por el terreno arrastrando y/o empujando implementos, portando sobre sí herramientas y sistemas mecánicos para sembrar, fertilizar y controlar malezas y plagas, y puede también accionar y controlar el funcionamiento de otras máquinas más complejas.

La maquinaria agrícola trabaja en condiciones de operación críticas, ya que debe estar operativa cuando sea necesaria principalmente en campañas (recolección u otras) debe garantizar el funcionamiento hasta su terminación, de ahí que tenga estrictos protocolos de mantenimiento específicos.

2. MANTENIMIENTO

El mantenimiento es un conjunto de tareas realizadas sobre un producto o servicio destinadas a conservar o corregir su estado para que pueda desempeñar la función que se le requiere. Existen diferentes estrategias de mantenimiento que fueron apareciendo en el tiempo y que en la actualidad deben convivir: correctivo, preventivo y predictivo. En la actualidad comienza a hablarse de una cuarta estrategia denominada mantenimiento proactivo o prognosis (aunque algunos autores la incluyen dentro de la estrategia de mantenimiento predictivo) [3].

Durante la primera revolución industrial el mantenimiento correctivo (sustitución del elemento cuando falla) era el único que se utilizaba. Dicha estrategia provocaba accidentes y pérdidas de equipos, además de paradas no programadas. La preocupación de las aseguradoras, que exigieron mejores cuidados, provocó la creación de talleres mecánicos para la sustitución efectiva de los elementos y los almacenes de repuestos. La experiencia de los usuarios de las máquinas y la normalización de los elementos mecánicos, para mantener la productividad y evitar fallos catastróficos, condujo a estrategias conservadoras de mantenimiento, englobadas en el mantenimiento preventivo, donde se establecían periodos de sustitución o revisión de los elementos en función del tiempo de uso y de la experiencia de fabricantes y usuarios. Es en los años sesenta, con el desarrollo de las industrias electrónica, espacial y aeronáutica, cuando se incorpora el mantenimiento predictivo a las estrategias de mantenimiento, donde la actuación no depende del tiempo de funcionamiento (mantenimiento preventivo) sino del estado o condición y de la fiabilidad mecánica del sistema [4].

La organización de los sistemas productivos ha evolucionado hacia una mejora basada en la productividad de los equipos, por tal motivo es necesario que operen con los máximos niveles de eficiencia y calidad, para consolidar un sistema productivo que pueda tener como objetivo los tres ceros; cero despilfarros, cero defectos y cero averías y problemas de seguridad [5].

El departamento de mantenimiento es el principal responsable de sostener los activos de la empresa en el nivel más alto de disponibilidad, a través de programas de mantenimiento preventivo y el control de las acciones correctivas. Para alcanzar la excelencia operativa y reducir las pérdidas a lo largo de la cadena de operación y al mismo tiempo, mejorar la capacidad de gestión del personal de producción, se debe buscar la integración completa de todo el equipo [6]. Para enfrentar este desafío, se han desarrollado nuevos métodos o modelos de administración aplicables a estos entornos:

- Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)
- Mantenimiento basado en el riesgo (RBM)
- Mantenimiento basado en la condición (CBM)
- Mantenimiento basado en la disponibilidad (ABM)
- Gestión de activos basada en evidencia (EBAM)

- *Prognosis Help Management (PHM)*

Las técnicas de mantenimiento avanzadas requieren en la mayoría de los casos de sistemas de gestión o herramientas informáticas [7]. La implementación de sistemas computarizados, con el objetivo de administrar los activos de la compañía, se considera una buena práctica de mantenimiento para lograr la excelencia. A pesar de esta realidad, el éxito depende de la adecuación del sistema informático a los requisitos funcionales de la empresa, y se pueden obtener muchos beneficios aplicando estrategias de administración de activos basadas en aplicaciones informáticas [8].

El uso de sistemas de mantenimiento inteligentes para predecir y monitorear el estado de las máquinas y sus componentes integrados con interfaces de realidad mixta puede brindar un valioso apoyo a los operadores de mantenimiento, para aislar y reparar los componentes del equipo que posiblemente fallen, según el análisis de sus comportamientos. Esto ayudaría a reducir el tiempo de mantenimiento y los costos causados por averías imprevistas de equipos industriales críticos, en los cuales, las fallas, pueden comprometer gravemente el proceso de producción [9].

En la actualidad, el mantenimiento ha evolucionado con la disponibilidad de equipos electrónicos de diagnóstico y de control sumamente fiables, para realizar mediciones periódicas y conocer el estado real de los equipos.

2.1. Objetivos del mantenimiento

La *European Federation of National Maintenance Societies* (EFNMS) define el mantenimiento como [10]: todas las acciones que tienen como objetivo mantener un equipo o restaurarlo a un estado en el cual se pueda llevar a cabo alguna función, estas acciones incluyen la combinación de las acciones técnicas y administrativas correspondientes.

Un mantenimiento correctamente gestionado, aumenta la vida útil de los equipos, además se alcanzan rendimientos aceptables durante más tiempo y se reduce las paradas inesperadas. El objetivo del mantenimiento se determina en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir, reparar, los fallos
- Disminuir la gravedad de fallos
- Evitar paradas de la maquinaria
- Evitar accidentes
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas
- Reducir costes
- Aumentar la vida útil de los equipos

2.2. Gestión del Mantenimiento

El desarrollo actual de la industria ha evolucionado el concepto de reparación. Antiguamente, el mantenimiento era considerado como una actividad auxiliar, donde el costo de éste era elevada. En la actualidad, el mantenimiento interviene en el proceso productivo, su costo ha disminuido y aumentado la vida útil de la maquinaria o los equipos.

Para organizar y modernizar el proceso de mantenimiento (resumido en la Fig. 1) se estudia la situación, se recopilan datos, se confeccionan estadísticas, se organiza científicamente el trabajo y, todo ello, va conformando un cuerpo de doctrina [11]. En la Fig. 1 se presenta un esquema sobre las diferentes fases de la organización del mantenimiento y los factores que influyen en estos.

Los principales factores que impiden lograr maximizar la eficiencia global de un equipo se han clasificado en seis grandes grupos y son conocidos como las seis grandes pérdidas, que se representan en la Fig. 2 con sus efectos. Las pérdidas se agrupan en tres categorías, tomando en consideración el tipo de mermas que pueden representar en el rendimiento de un sistema productivo, con intervención directa o indirecta de los equipos de producción [13].

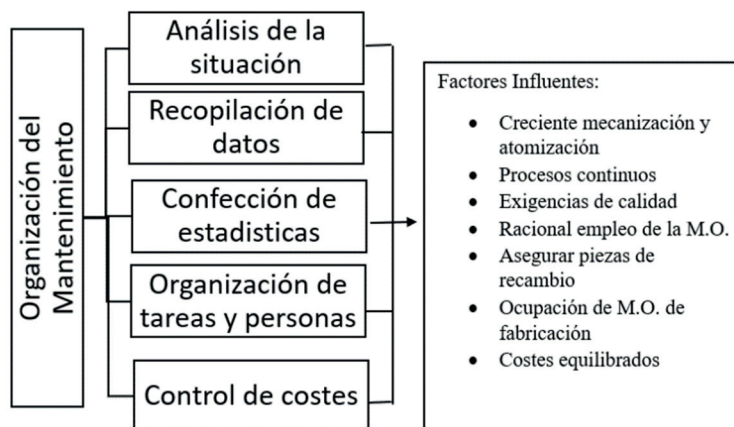


Fig. 1. Organización del mantenimiento [12].

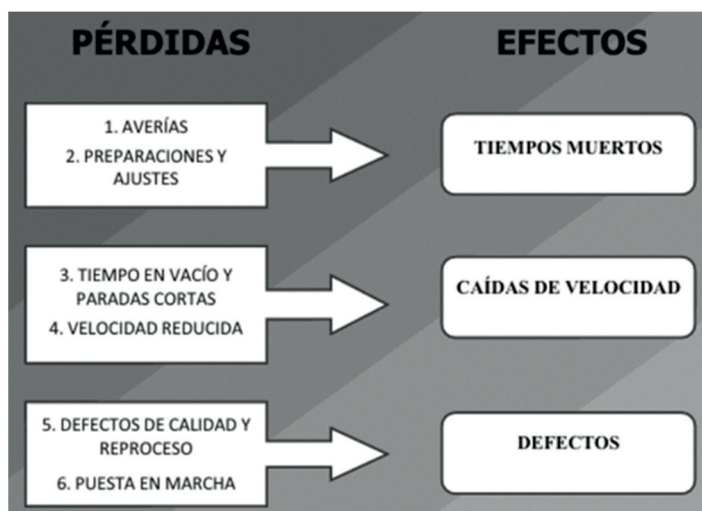


Fig. 2. Las siete pérdidas y su agrupación [14].

3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Con el mantenimiento predictivo se efectúa un seguimiento de las variables concernientes al funcionamiento de las máquinas para poder predecir posibles fallas y tomar las acciones correctivas en el momento oportuno [14].

La ejecución del mantenimiento predictivo, en la actualidad implica costos elevados de inversión en equipos, desarrollo y formación de los operarios. A pesar de estas desventajas, hoy en día, hay una tendencia creciente a su implementación en la mayoría de las industrias, por los beneficios que esta presenta, en especial, el poder conocer el estado de las máquinas en cualquier instante del tiempo, logrando un funcionamiento óptimo, aumentando la seguridad, reduciendo el stock de piezas para el mantenimiento correctivo, aumentando los tiempos de inspección del mantenimiento preventivo y evitando fallos catastróficos.

En el marco del mantenimiento predictivo existen una serie de ensayos no destructivos, enfocados al diagnóstico del funcionamiento de los equipos, para descubrir advertencias que indiquen un mal funcionamiento en alguna de sus partes [15]. Una vez descubiertos los desperfectos, se programan las reparaciones o revisiones respectivas, sin afectar al proceso de producción o funcionamiento de las máquinas [16]. Por otra parte, dentro del mantenimiento predictivo se encuentra la monitorización de la condición, donde se

visualizan un conjunto de variables representativas durante el funcionamiento de la máquina y se establecen unos valores de alerta y alarma para la toma de decisiones. Seguidamente, se exponen las técnicas más comunes utilizadas en el mantenimiento predictivo.

3.1. Análisis de vibraciones

La vibración se define como el cambio de posición en el tiempo, de una parte, o de todo un elemento respecto a su posición de equilibrio [17].

Según la normativa ISO 10816 [18] se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. El análisis de las vibraciones puede realizarse en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia o, en su caso, en el dominio tiempo-frecuencia [19].

El análisis de vibraciones se utiliza fundamentalmente en la monitorización de máquinas rotativas. Tradicionalmente, en el análisis en el dominio del tiempo se estudiaba la evolución temporal de parámetros estadísticos como RMS, curtosis o valor de pico, entre otros. En el dominio de la frecuencia, los estudios de los espectros de frecuencia mediante la aplicación de la transformada de Fourier permiten detectar el tipo y severidad de fallo de algunos elementos críticos de la máquina (como rodamientos, ejes o engranajes, entre otros) debido a que sus frecuencias de fallo son ampliamente conocidas. Aunque no siempre es posible detectarlas en servicio.

3.2. Termografía

La termografía es una técnica que ha tenido una constante evolución, como medio de monitoreo en tiempo real de la temperatura; en equipos, máquinas y motores. Provee datos para conocer el estado o condiciones de los equipos, y así evitar daños o paradas inesperadas, con el desarrollo de nuevas herramientas de procesamiento de imágenes termográficas y el aprendizaje autónomo se ha logrado obtener resultados más pronto y sin interferencia humana. A diferencia de otras metodologías de monitoreo de condición, la termografía infrarroja proporciona una imagen pseudo codificada por colores en tiempo real del objeto y la manifestación visual de los defectos [20].

3.3. Emisión acústica

Se basa en el estudio de las ondas del sonido de alta frecuencia (superiores a las que percibe el oído humano) que se producen en las máquinas. El oído humano puede percibir frecuencias de 20 Hz y 20 kHz [21]. Dependiendo de la condición operativa de la máquina dichas ondas serán diferentes y permitirán analizar el estado de la máquina. La aplicación de análisis por emisión acústica se hace indispensable especialmente en la detección de fallas existentes en equipos rotantes que giran a velocidades inferiores a 300 rpm [22], donde la adquisición de vibraciones no ofrece diagnóstico concluyente, por otra parte esta técnica no es viable en la aplicación de vehículos por el régimen de trabajo ya que se hace necesario el desmontaje del elemento a auscultar.

3.4. Análisis de aceites

El análisis de aceites estudia las propiedades fisicoquímicas y el tamaño de las partículas del fluido, utilizado en una determinada máquina, ayudando así a conocer la operación y el estado de la misma. El aceite, por su función lubricante, tiende a contaminarse y, por ello, se debe sustituir cada determinado tiempo (mantenimiento preventivo). Sin embargo, cuando el aceite presenta, en su composición, determinados contaminantes (como partículas metálicas o degradación del mismo), es síntoma que la máquina no funciona correctamente y esto se puede identificar con el estudio del aceite usado. El grado de contaminación del aceite está relacionado con la presencia de partículas de desgaste, de sustancias extrañas o degradación química de su composición [23].

4. TRACTOR AGRÍCOLA

Se entiende por tractores agrícolas a los vehículos autopropulsados con motor, capaces de arrastrar, empujar y accionar máquinas, móviles o estacionarias y que pueden trabajar fuera y dentro de las vías públicas. Se puede decir que el tractor agrícola es una máquina dotada de una fuente de potencia (motor diésel) y medios de locomoción propios (ruedas/orugas), utilizada principalmente, como sistema de tracción y transporte de otros equipamientos, para la realización de distintas operaciones en la propiedad rural [24]. En la Fig. 3 se presenta el esquema de un vehículo agrícola con sus partes mecánicas críticas.

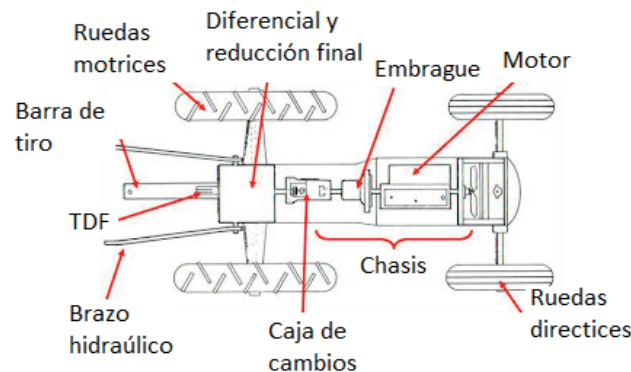


Fig. 3. Esquema general del tractor.

La maquinaria agrícola es un elemento primordial e importante en la agricultura extensiva y se convierte en una inversión fundamental para el desarrollo de esta actividad. La conservación y reparación de la maquinaria agrícola son un componente importante de los costos operativos. Sin embargo, variables como los costos de mantenimiento y las horas acumuladas de uso se han considerado ampliamente para determinar la vida útil óptima del tractor [25].

Los costos de conservación y reparación dependen de la operación del tractor, la falta de repuestos, las habilidades del operador, las condiciones de cultivo, clima, la política de mantenimiento y otros factores [26].

El empleo de maquinaria tiene una influencia directa en la industria agrícola, donde se pueden mencionar como características más importantes las siguientes: reducción de tiempos y costos de cosecha, contrarrestar el déficit creciente de mano de obra y el poder realizar la cosecha en el horario más conveniente [27]. De todas las averías detectadas en vehículos agrarios, los relacionados con el motor se consideran las más críticas por diferentes motivos, el primero por del funcionamiento del motor depende el funcionamiento del resto de los sistemas asociados y, por otra parte, porque el mantenimiento del mismo no es una tarea sencilla a realizar por parte del operador. Bakht *et al.* estudiaron las averías de los tractores agrícolas y su mantenimiento en setenta granjas y los resultados arrojaron que el 69% cambian el aceite del motor cerca de lo indicado por el fabricante y tan solo el 23% cambian el aceite de la transmisión en las horas de trabajo estipuladas. Dando como resultado que un 41% de tractores tengan desperfectos mecánicos por no cambiar aceite (motor, transmisión), seguido de problemas en el sistema de combustible (inyector, bomba) 39%, por último las fallas en el sistema hidráulico fueron del 20% [28]. Tomando en cuenta los datos antes mencionados se puede comprender la importancia de mantener el buen funcionamiento del motor, ya que de este dependen los demás sistemas que conforman el tractor agrícola, uno de los aspectos esenciales a tomar en cuenta para su correcto funcionamiento es el mantenimiento preventivo (cambio de lubricantes), los daños del sistema de combustible se producen por la mala calidad de combustible o por problemas en la filtración, esto ocasiona fallos en el motor y posibles paradas no programadas.

5. DIAGNOSIS DE AVERÍAS EN ELEMENTOS MECÁNICOS ASOCIADOS AL TRACTOR

La medición de la vibración en motores de combustión interna ciclo diésel se ha comprobado como una herramienta idónea para monitorear y diagnosticar el motor en funcionamiento y predecir posibles fallas antes que estas afecten al trabajo del vehículo agrícola.

Uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta para evitar averías es el manejo u operación del tractor, donde el operario debe contar con los conocimientos de mecánica necesarios, tanto teóricos como prácticos, que le puedan llevar al diagnóstico de una determinada avería. Actualmente, debido a la tecnología empleada en la maquinaria agrícola, estos conocimientos deben estar complementados con conocimientos de sistemas eléctricos y electrónicos. La implantación de un sistema automatizado de diagnóstico facilitaría la toma de decisiones del operario, así como permitiría guiarle en las tareas de mantenimiento.

5.1. Clasificación de las averías

Las averías en un motor de vehículo agrícola pueden ser originadas por diferentes causas y pueden presentar diversos síntomas. Se puede hacer una clasificación donde se puedan agrupar la mayoría de las averías según su probabilidad de ocurrencia:

- *Repetitivas*. Son las más habituales, el operario realiza un diagnóstico rápido, aunque debe establecer alguna prueba que confirme la causa de esta, para no equivocarse.
- *Menos frecuentes*. Son averías esporádicas que aparecen normalmente cuando el vehículo no está en el taller. Se debe realizar un seguimiento hasta que aparezca el síntoma con claridad y localizar la avería.
- *Muy poco frecuentes*. Estas averías, en su diagnóstico, presentan un grado mayor de dificultad, ya que el motor funciona perfectamente y no existe motivo alguno para el fallo. Suelen ser motivo de falsos contactos u otros fallos, que aparecen y desaparecen esporádicamente, muy difíciles de localizar. Requieren de la intuición y experiencia del operario y de un prolongado tiempo de seguimiento, aunque, una vez detectada la avería, no suele ser difícil de reparar.

5.2. Diagnóstico de averías en el motor

En este apartado se describen las averías del motor por los síntomas que presentan (en la Tabla 1) y las averías del motor por los elementos que lo conforman (Tabla 2).

Tabla 1. Averías por síntomas.

SÍNTOMA	AVERÍA		
Al motor le resulta imposible girar	Segmentos pegados		
	Distribución a destiempo		
	Motor recalentado		
	Motor congelado		
El motor puede girar, pero no arranca	Falta de combustible	Comprobación del sistema de inyección	
	Fallo en el encendido	Estado de las bujías	Electrodos desgastados
			Electrodos engrasados
			Aislante agrietado
	Falta de compresión	Fallo en el circuito de alta tensión o bobinas	
		Comprobación de sensores y generadores de impulso	
		Defectos de ajuste de la culata	Junta de culata defectuosa
			Válvulas pisadas
		Desgaste entre cilindros y émbolos	Ovalado del cilindro
			Segmentos deformados
			Pistones defectuosos
		Desgaste en las válvulas	Holgura excesiva
			Asiento de válvulas defectuoso
	Mala sincronización de los elementos.	Comprobación de la distribución	

SÍNTOMA (Cont.)	AVERÍA (Cont.)	
	Entrada de líquido refrigerante en los cilindros.	Falta de hermeticidad de la junta de culata.
Al motor le cuesta arrancar	En frío	Comprobación sistema de alimentación y/o precalentamiento (MEC) Mal funcionamiento de la inyección Defectos en el sistema de encendido Falta de compresión en los cilindros
	Arranca en frío, pero se para	Mal funcionamiento de la inyección Comprobación del circuito de encendido
	En caliente	Falta de hermeticidad en los cilindros
Al vehículo le falta potencia	Avería en el circuito de engrase	Lubricante no adecuado Avería en la bomba de engrase
	Reglaje de encendido incorrecto	Mala puesta a punto inicial Bujías en mal estado
	Válvulas que no cierran	Válvulas picadas Muelles flojos Holgura excesiva en las guías de válvulas Asientos en mal estado Levas desgastadas
	Comprobación del sistema de alimentación	
	Comprobación de la compresión de los cilindros.	Cilindros ovalados Pistones defectuosos
	Mala refrigeración	Falta de líquido refrigerante Bomba de agua defectuosa Pérdida de líquido refrigerante Radiador obstruido Mal funcionamiento del termostato Mal funcionamiento del electroventilador
	Escape obstruido	
El motor es irregular a bajas revoluciones	Mala puesta a punto Mal calado de la distribución Mal funcionamiento del sistema de alimentación Entradas indebidas de aire	
El motor se calienta	Reglaje de encendido defectuoso, demasiado adelanto o atraso Hermeticidad de la culata defectuosa Fallos en el circuito de engrase o refrigeración	
El motor presenta vibraciones	Puesta a punto defectuosa Fallo en los cilindros Equilibrados defectuosos Sistema de inyección defectuoso	
Se observa un elevado consumo de combustible	Puesta a punto defectuosa Verificación del sistema de alimentación Verificación de la inyección	
En el motor se escuchan ruidos extraños	Picado y/o detonación	
	Autoencendido	
	Ruido en un solo cilindro a cada vuelta	El émbolo golpea alguna válvula
Sale mucho humo por el escape	Ruidos con el ritmo de las explosiones	Holgura excesiva de los taqués Segmentos rotos Piezas rodantes defectuosas Muelles de válvulas flojos
	Humo negro	Filtro de aire sucio Mezcla muy rica Presión de combustible muy elevada
	Humo azul	Segmentos en mal estado Retenes de válvulas en mal estado Desgastes en los émbolos y en los cilindros
	Humo blanco	Junta de culata rota Culata agrietada o deformada

A continuación, en la Tabla 2 se analizará las averías del motor por los elementos que lo conforman:

Tabla 2. Averías por elemento.

SÍNTOMA	AVERÍA		
En la culata y en las válvulas	Compresión baja o desigual en los cilindros	Válvulas	Holgura incorrecta Quemadas o deformadas Asientos en mal estado Muelles flojos o rotos Distribución mal sincronizada
		Culata	Junta de culata quemada Culata en mal estado Pistones
	Compresión muy alta.	Exceso de carbonilla en la cabeza del pistón o en la zona alta de la cámara de combustión	
	Ruido en la parte alta del motor	Holgura excesiva en el juego de válvulas Válvula gripada en su guía Muelle roto Árbol de levas desgastado o roto Cadena o correa de distribución floja Tensor correa/cadena floja o rota	
En el bloque de cilindros	Golpes en el cigüeñal	Juego excesivo entre el cojinete y las muñequillas del cigüeñal Muñequillas ovaladas Cigüeñal desequilibrado	
	Ruidos en la biela	Juego excesivo entre cojinetes y muñequillas de la biela Muñequillas de biela defectuosas Aceite inadecuado Lubricación insuficiente	
	Ruidos en los pistones	Juego excesivo entre émbolo y cilindro. Juego excesivo entre segmentos y ranuras de alojamiento	
	Eje de pistón	Juego excesivo entre émbolo y bulón Juego excesivo entre el eje de émbolo y el cojinete de pie de biela	
En la lubricación	La luz testigo se enciende durante el funcionamiento del motor	Falta de aceite en el cárter Aceite muy diluido o inadecuado Aceite muy caliente Bomba de aceite defectuosa Cojinetes del motor desgastados	
	El manómetro no marca	Falta de aceite en el cárter Aceite muy diluido Bomba de aceite defectuosa	
	El manómetro marca a ralentí, pero desciende al acelerar	Falta de nivel de aceite en el cárter Filtro de aceite obstruido	
	El manómetro marca una presión excesiva	Aceite frío Tuberías obstruidas Aceite muy espeso	
	Oscilaciones en el manómetro	Falta de aceite en la bomba	
	Consumo excesivo de aceite	El aceite penetra por los segmentos y se quema dentro del cilindro Consumo de aceite por las guías de válvulas Junta de culata deteriorada Grieta en la culata Pérdidas de aceite por juntas de estanqueidad	
	Aumento del nivel de aceite en el cárter	El líquido refrigerante penetra en el cárter, por alguna grieta o por deterioro de la junta de culata Combustible en el cárter	

6. PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN MOTORES AGRÍCOLAS

En base a los estudios anteriores en esta sección se propone una tarea de mantenimiento basado en la condición del motor de un vehículo agrario. Como método indirecto para el diagnóstico de la combustión, la vibración del motor ayuda a extraer información concerniente a esta.

En primer lugar, las vibraciones mecánicas en motores de combustión interna tienen un grado de importancia dentro del mantenimiento, ya que se puede identificar el estado del motor y prevenir fallas.

Según Rodríguez las principales fuentes de vibración en motores de combustión interna son debidas a: el movimiento del cigüeñal, el movimiento del sistema biela – manivela, la combustión y la operativa de las válvulas. De todas ellas, las dos últimas son inevitables mientras que el resto dependen del diseño y tipo de motor [29].

La combustión, por sus características de transformar una energía química en mecánica, presenta un contenido de baja frecuencia, estas se dan por la fuerza de impacto que ocasionan en el trabajo de las válvulas (por las holguras con las que trabajan) y en el inyector de combustible (en la cámara de combustión).

Las vibraciones en el mecanismo de las válvulas ocurren por el impacto de su trabajo (holgura térmica), a mayor número de válvulas mayor serán las vibraciones y por ende el ruido en los motores, de igual manera depende del régimen al cual trabajen.

Las fallas más comunes en los motores de tractores agrícolas (motores diésel) están relacionados con el sistema de alimentación del combustible, que afecta al correcto funcionamiento de los inyectores y la bomba. Esto puede producirse debido a dos aspectos principales: mala calidad de combustible y/o falencias en el mantenimiento. El primero es uno de los aspectos más problemáticos ya que disminuye la vida útil y aumenta el coste del mantenimiento, el segundo se produce por la falta de herramientas tecnológicas. Las rutinas de mantenimiento en general se basan a kilometrajes y/o horas de trabajo (mantenimiento preventivo) y no a la condición o estado de los elementos que deben ser sustituidos.

Otra falla rutinaria se la considera al sistema de válvulas (admisión de aire y escape de gases), esto es debido al trabajo que están sometidos los tractores, donde el cambio del régimen del motor es constante por la topografía de la zona, de igual manera por las condiciones de trabajo (clima y presión atmosférica).

El sistema de mantenimiento predictivo de motor de combustión interna propuesto pretende monitorizar el funcionamiento del motor, desde el punto de vista del proceso de la combustión, mediante la adquisición de medidas de vibración y el procesamiento de las mismas. Desde el punto de vista teórico se conoce que existen unas ventanas de frecuencia en las señales de vibración donde es posible analizar el proceso de combustión [30], [31]. Estas bandas de frecuencia se analizan tradicionalmente usando la transformada de tiempo-frecuencia y análisis de coherencia, obteniendo diferentes rangos en función de la máquina que se encuentran en torno a los 500 Hz (para velocidades de rotación del motor en el rango de las 2000 rpm). Por otra parte, la diferencia del comportamiento de la presión en el cilindro y el impacto de la válvula se aprecia en componentes de frecuencia del orden 3,2 ~ 6,4 kHz [34].

La metodología a seguir para la monitorización de la condición de un motor de un vehículo agrario se resume en la Fig. 4.

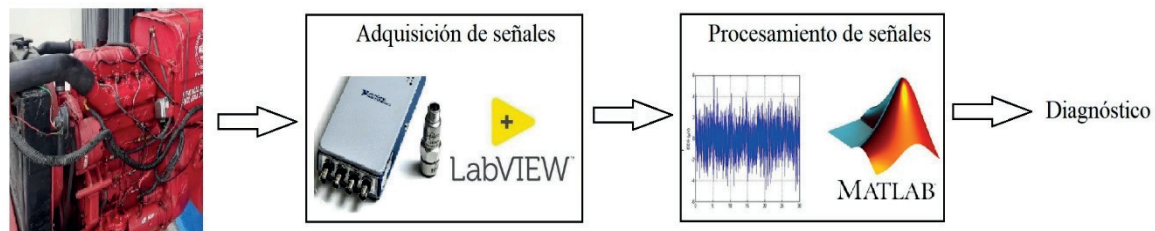


Fig. 4. Esquema de monitorización de estados.

Para la validación del sistema propuesto se hace necesario obtener un número considerable de datos para interpretar su comportamiento en diferentes condiciones de funcionamiento. Para ello se está desarrollando un banco de ensayos de un motor de un vehículo agrícola genérico (ver Fig. 4 imagen izquierda). El motor deberá permitir la inclusión de diferentes tipos de fallos de entre los más comunes. Al motor se le

incorporará un sistema sensorial para la adquisición de medidas de vibración, temperatura y régimen del motor (en Fig. 4, adquisición de datos, imagen central).

En cuanto a la medida de vibración, se prevé utilizar un acelerómetro unidimensional (ICP 603C01 con sensibilidad de $10.2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$). La señal es adquirida por la tarjeta de adquisición (NI 9250) con una frecuencia de muestreo es de 8.000 Hz , y el programa utilizado para la etapa de adquisición es LABVIEW. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de una primera señal adquirida del motor sin falla.

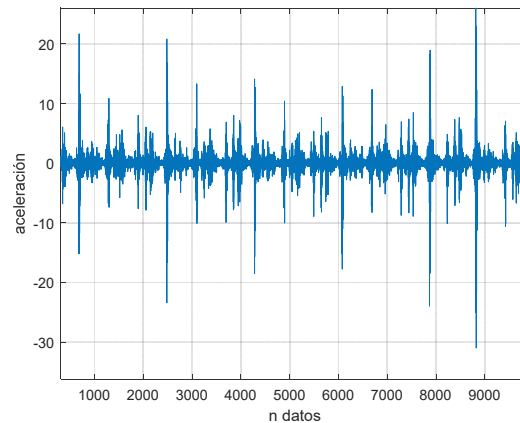


Fig. 5. Señal de vibraciones motor sin falla.

Las señales obtenidas necesitan un procesamiento para poder representar de manera óptima el comportamiento dinámico del sistema, dando como resultado características de las señales para cada estado real (en la Fig. 4. procesamiento de señales. Imagen derecha). El objetivo final de esta metodología será diagnosticar de manera remota, evitando que el personal de mantenimiento tome decisiones sobre el estado del motor.

De esta manera se propone un sistema de monitorización de vibraciones de un motor diésel de un vehículo agrícola, incluyendo un sensor de medida el cual estará ubicado en el bloque de cilindros lo más cercano a la cámara de combustión, el sensor proveerá de medidas de vibración a un sistema de adquisición que se diseñó en LabVIEW, se propone el uso de una tarjeta de adquisición de vibraciones la cual esta incorporada a un chasis para poder enlazar el sensor con el ordenador, posterior a esta acción llevará dichas señales a un procesador en el cual se utilizará el software MATLAB® para procesar los datos por medio de la Transformada de Fourier y así realizar la conversión en medidas para monitorizar y predecir fallas en los sistemas del motor en especial en los críticos (válvulas e inyectores) que están relacionados directamente con la combustión.

La señal, se procesa con el cálculo de la Densidad de Potencia Espectral (PSD, del inglés *Power Spectral Density*) para un primer análisis del comportamiento del sistema. En la Fig. 6 se presenta la PSD de la señal mostrada en la Fig. 5, donde se pueden observar las frecuencias características del motor.

Una vez analizadas las señales en el dominio de la frecuencia e identificadas las frecuencias características, el trabajo futuro se dirige hacia el estudio de la selección de patrones que permitan identificar de manera clara el comportamiento y estado de la máquina durante su vida útil.

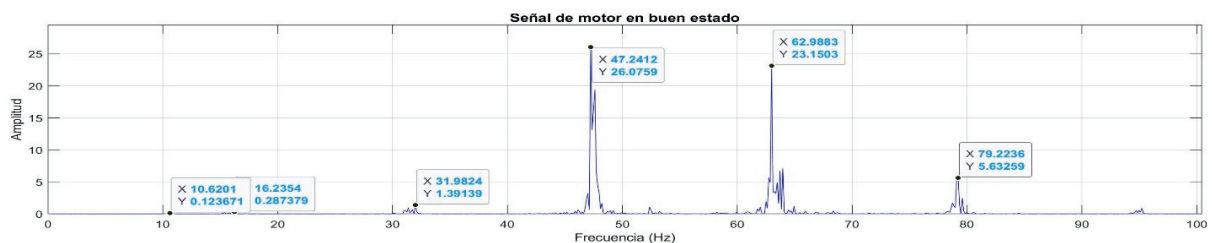


Fig. 6. Procesamiento de señales PSD.

7. CONCLUSIONES

El mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones es una metodología confiable que permite analizar el motor en buen estado y con diferentes fallas, obteniendo datos fiables para la predicción de anomalías, mejorando la etapa de decisión sobre las acciones a llevar a cabo en las tareas de mantenimiento programadas.

Los sistemas que presentan inconvenientes rutinarios en un tractor agrícola son: sistema de inyección y sistema de admisión de aire y salida de gases. Estos sistemas afectan directamente a la combustión provocando un aumento de vibraciones y por ende fallas en el motor.

Según la Tabla 2, el motor tiende a cambiar la vibración cuando tiene defectos en el funcionamiento de los cilindros, mala sincronización y fallos en el sistema de inyección. Estos defectos están asociados a los sistemas que fallan rutinariamente, y afectan directamente a la combustión provocando una pérdida de trabajo y futuros daños considerables del motor.

Para un correcto manejo de la gestión del mantenimiento predictivo se debe tomar en cuenta el historial de los fallos y la bitácora de mantenimiento, de igual manera se debe conocer las posibles defectología de los tractores para determinar las zonas críticas y los puntos adecuados de toma de señales.

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología novedosa que tiene como objetivo adquirir características del comportamiento del motor (combustión) a partir de un sensor de vibraciones (acelerómetro) ubicado en el bloque de cilindros.

El experimento tendrá lugar en un motor diésel. El procesamiento de los datos obtenidos permitirá validar la existencia de una banda de frecuencia en las vibraciones que dependen del estado del motor (buen o mal estado), donde se tratará de determinar que bandas son independientes a las condiciones del funcionamiento del motor.

Indicar, que los resultados se obtendrán en primera instancia en un motor acoplado a una bancada fija, y se comprueba que el comportamiento es similar a otros resultados encontrados en la literatura. Esto permite validar el banco de ensayos, a partir de aquí habrá que incluir señales de ruido y medidas en campo para validar la metodología en campo.

AGRADECIMIENTO

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-116984RV-C22, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, los autores quieren agradecer también a la Universidad Técnica del Norte (Ibarra – Ecuador) por la financiación recibida para el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. López-Núñez, C.A. Trinchet-Varela, R. Pérez-Rodríguez, J.A. Vargas-Guativa, "Procedimiento para evaluar el mantenimiento en una flota de transporte de combustibles por carretera," *Ing. Mecánica*, **24**(1), 1–14 (2021)
- [2] E. Hetz, L. Reina, "Consumo y alternativas de ahorro de combustible en la utilización de tractores agrícolas," *La Técnica Rev. las Agrociencias. ISSN 2477-8982*, 9, 6 (2013), doi: 10.33936/la_tecnica.v0i9.541.
- [3] L. Sanzol, "Implantación de plan de mantenimiento TPM en planta de cogeneración," *Tesis*, 2010, [Online]. Available: <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/2049/577191.pdf?sequence=1>.
- [4] D. Mesa, Y. Ortiz, M. Pinzon, "LaConfiabilidadLaDisponibilidadYLaMantenibilidadDi-4830901," *Sci. Tech. Año XII*, 30, 155–160 (2006)
- [5] R. Carro, D. González, Gómes, "El sistema de producción y operaciones," *Fac. Cienc. económicas y Soc.*, vol. 1, p. 28, 2007, doi: 10.1109/CLEO.2007.4453360.
- [6] M.H.G.I.A. Rodríguez, M. Ii, E. Martínez, D. Ii, "A new approach for strategic maintenance management based on soft-computing generics algorithms Un nuevo enfoque para la gestión del mantenimiento estratégico basado en algoritmos genéricos informatizados," *21*(2), 101–107 (2018)
- [7] M. Herrera, E. Martínez, "Management audit applied to the maintenance department in hospital facilities," *Ing. Mecánica*, **20**(3), 152–159 (2017) [Online]. Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v20n3/im07317.pdf>.

- [8] J.E. Amadi-Echendu, F.C.P. de Wit, “Technology adoption: A study on post-implementation perceptions and acceptance of computerised maintenance management systems,” *Technol. Soc.*, 43, 209–218 (2015) doi: 10.1016/j.techsoc.2015.09.001.
- [9] D.B. Espíndola, L. Fumagalli, M. Garetti, C. E. Pereira, S.S.C. Botelho, R. Ventura Henriques, “A model-based approach for data integration to improve maintenance management by mixed reality,” *Comput. Ind.*, **64**(4), 376–391 (2013) doi: 10.1016/j.compind.2013.01.002.
- [10] Asociación Española para la Calidad, “Mantenimiento” 2019. https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/mantenimiento?p_p_id=56_INSTANCE_e0N5&p_p_lifecycle=0&p_p_state=exclusive&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&_56_INSTANCE_e0N5_struts_action=%2Fjournal_content%2Fview&_56_INSTANCE_e0N5_groupId=10128&_56_INSTANCE_e0N5_articleId=1133065&_56_INSTANCE_e0N5_viewMode=print (accessed May 29, 2021).
- [11] R. Calduch, “Metodos y tecnicas de investigacion,” *Esc. Norm. Super. Argentinos*, 2, 180 (2014)
- [12] J. Ardila Marin, M. Ardila Marín, D. Rodríguez, D. Hincapié Zuluaga, “La gerencia del mantenimiento: Una revisión,” *Dimens. Empres.*, **14**(2), 129–144 (2016)
- [13] J. Jaumandreu Patxot, “Ingeniería de mantenimiento,” *Ing. química*, **31**(360), 87–91 (1999)
- [14] P.K. Behera, B. S. Sahoo, “Leverage of Multiple Predictive Maintenance Technologies in Root Cause failure analysis of Critical Machineries,” *Procedia Eng.*, 144, 351–359 (2016) doi: 10.1016/j.proeng.2016.05.143.
- [15] A. Moosavian, G. Najafi, B. Ghobadian, M. Mirsalim, “The effect of piston scratching fault on the vibration behavior of an IC engine,” *Appl. Acoust.*, 126, 91–100, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.05.017.
- [16] A. Moosavian, G. Najafi, H. Nadimi, M. Arab, “Estimation of engine friction using vibration analysis and artificial neural network,” *2017 Int. Conf. Mech. Syst. Control Eng. ICMSC 2017*, 130–135, 2017, doi: 10.1109/ICMSC.2017.7959457.
- [17] J.R. Sánchez Soto, A. del C. Téllez Anguiano, R.F. Escobar Jimenez, G.M. Chávez Campos, J.A. Gutiérrez Gnechchi, “Vibration analysis system applied to fault detection in wind turbines,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, **20**(3), 1–13 (2019) doi: 10.22201/fi.25940732e.2019.20n3.028.
- [18] I. O. for Standardization, “Norma ISO 18816.” 24 (2011)
- [19] G. Marichal, M.L. Castillo Zas, J. López, I. Padrón, M. Artés, “Diagnóstico de engranajes en sistemas de propulsión marinos utilizando técnicas ANFIS,” *Rev. Iberoam. Ing. mecánica*, **20**(1), 37–47 (2016)
- [20] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, “Infrared thermography for condition monitoring - A review,” *Infrared Phys. Technol.*, 60, 35–55 (2013) doi: 10.1016/j.infrared.2013.03.006.
- [21] K. Wegener, F. Bleicher, U. Heisel, H.W. Hoffmeister, H.C. Möhring, “Noise and vibrations in machine tools,” *CIRP Ann.*, **70**(2), 611–633 (2021), doi: 10.1016/J.CIRP.2021.05.010.
- [22] Renovetec, “No Title,” *Análisis de ultrasonido* (2018) <http://www.renovetec.com/268-renovetec-servicios/analisis-de-ultrasonido>.
- [23] F. Saldivia, “Aplicación De Mantenimiento Predictivo . Caso Estudio: Analisis De Aceite Usado En Un Motor De Combustion Interna,” *Innov. Eng. Technol. Educ. Compet. Prosper.*, 1–10 (2013)
- [24] N. Andersson, A. Machado, A. dos Reis, M. Conill Gomes, M. Ferreira, “Desenvolvimento da metodologia multicritério como modelo na seleção de tratores de quatro rodas,” *Rev. la Fac. Agron.*, **114**(2), 265–270 (2015)
- [25] S.A. Al-Suhaibani, M.F. Wahby, “Farm tractors breakdown classification,” *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, **16**(3), 294–298 (2017) doi: 10.1016/j.jssas.2015.09.005.
- [26] M. Lips, “Repair and maintenance costs for nine agricultural machine types,” *Trans. ASABE*, **56**(4), 1299–1307 (2013) doi: 10.13031/trans.56.10083.
- [27] C. Bocca *et al.*, “Estructura De Parral,” 15, 23–32 (2011)
- [28] G. M. K. Bakht, H. Ahmadi, A Akram, M. Karimi, “Repair and Maintenance Cost Models for Mf285 Tractor: A Case Study in Central Region of Iran,” *Adv. Biol. Res. (Rennes)*, **3**(1–2), 76–80 (2009)
- [29] J. Rodríguez-Matienzo, “Diagnosis of IC Engines using vibrations,” *Ing. Mecánica*, **21**(2), 82–92 (2018)
- [30] Arnone, L., Boni, M., Manelli, S., Chiavola, “Monitoreo de la combustión del motor diésel a través del análisis de señal de vibración de bloque,” *SAE World Congr. Exhib.*, 9 (2019)
- [31] L. Arnone, M. Boni, S. Manelli, O. Chiavola, S. Conforto, E. Recco, “Diesel engine combustion monitoring through block vibration signal analysis,” (2009) doi: 10.4271/2009-01-0765

- [32] S. Lee, Y. Lee, S. Lee, H.H. Song, K. Min, H. Choi, "Study on the Correlation between the Heat Release Rate and Vibrations from a Diesel Engine Block," *SAE Tech. Pap.*, April (2015), doi: 10.4271/2015-01-1673.
- [33] I. Jung, J. Jin, K. Won, S. Yang, K. Min, H. Choi, "Closed-loop control for diesel combustion noise using engine vibration signals," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-June (2015), doi: 10.4271/2015-01-2297.
- [34] W. Yang, C. Yong, "Vibration Measurement for Combustion Phase Evaluation in a CI Engine," *IFAC-PapersOnLine*, **51**(31), 821–826 (2018), doi: 10.1016/j.ifacol.2018.10.122.

PREDICTIVE MAINTENANCE IN AGRICULTURAL TRACTORS

Abstract – Predictive maintenance techniques, and in particular those based on condition monitoring are gaining great interest within maintenance management for their interaction with the pillars of the Industry 4.0 paradigm that are being integrated into the industry. Predicting failures before they occur is one of the most important advantages of this technique that allows you to avoid unexpected stops and reduces maintenance and operation costs. The objective of this study is to present the techniques associated with the implementation of predictive maintenance in agricultural tractors and the advantages that these could generate. To this end, this paper details, in addition to the common breakdowns of the engines of agricultural vehicles and the most frequent failure elements, the methodology to implement a predictive maintenance system in the critical elements of an agricultural vehicle.

Keywords – Agricultural Vehicle, Predictive Maintenance, Tractor Breakdowns, Industry 4.0, Condition-Based Monitoring.

REVISTA IBEROAMERICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA

INFORMACIÓN Y SUSCRIPCIONES

Para solicitar información sobre la revista o suscripción y forma de pago, rellenar el siguiente formulario y remitirlo por fax al número +34 913 986 536, o escribir un correo electrónico a la dirección ribim@ind.uned.es.

Nombre y apellidos

Institución

Departamento

Cargo

Dirección completa

Teléfono Fax

E.mail

El precio de la suscripción anual (2 números de la revista) es de 36 euros (45 USD). Se pueden solicitar números sueltos al precio de 20 euros (25 USD). Suscripción gratuita para los miembros de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica.

Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica

La Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica es una publicación semestral que edita la Universidad Nacional de Educación a Distancia desde 1997.

MENÚ DE LA ESCUELA

Portada de la Escuela

Bienvenida de la dirección

Órganos de gobierno

Departamentos

Personal Docente

Calidad

Buzón de sugerencias y reclamaciones

GRADOS

MÁSTERES

DOCTORADOS

ESTUDIANTES

COMUNIDAD PRE-MATRÍCULA

REVISTA

Revista RIBIM

Portada

Comité Editorial

Información de Autores

Listado de Revisores

Bases de Datos

Contacto

Enlaces

NÚMEROS PUBLICADOS

Año 2021 (Volumen 25)

V25N2 Octubre 2021

V25N1 Abril 2021

Año 2020 (Volumen 24)

V24N2 Octubre 2020

V24N1 Abril 2020

Año 2019 (Volumen 23)

V23N2 Octubre 2019

V23N1 Abril 2019

Objetivos y alcance

El objetivo fundamental de la Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica es proporcionar un medio de comunicación entre los ingenieros y científicos que trabajan en la investigación y el desarrollo en el vasto campo de la Ingeniería Mecánica, y fomentar los lazos de colaboración entre los países iberoamericanos.

La Revista publica trabajos originales, tanto teóricos como experimentales, que aporten nuevas ideas o técnicas relacionadas con cualquiera de las áreas de la ingeniería mecánica, como son: mecánica fundamental, teoría de máquinas y mecanismos, tribología, robótica, vibraciones, mecánica de fluidos, turbomáquinas, vehículos, fabricación, metrología, mantenimiento, calidad, estructuras, materiales, métodos numéricos y diseño asistido por computador.

ÚLTIMO NÚMERO PUBLICADO

Volumen 25 Nº2 octubre 2021

Copyright © 1997 Universidad Nacional de Educación a Distancia

ISSN 1137-0729. Depósito legal: M.1330-1997

Edita: SECCIÓN DE MEDIOS IMPRESOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Calle Bravo Murillo 38, 28016 Madrid

Impreso en España - Printed in Spain

Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica

SECCIÓN DE MEDIOS IMPRESOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Editor

Profesor Renato Natal Jorge

Universidad do Porto, Secção de Mecânica Aplicada

Rua Dr Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Editora asociada

Profesora María Lourdes del Castillo Zao

Universidad Nacional de Educación a Distancia

Juan del Rosal 12, 28040 Madrid, España

Página web de la

Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica

<https://www.uned.es/universidad/facultades/en/industriales/investigacion/RIBIM.html>