



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN UN SISTEMA DE BOMBEO UTILIZANDO TÉCNICAS CFD Y ANÁLISIS MODAL, PARA DETERMINAR SU INFLUENCIA EN LOS PARÁMETROS DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO EN EL LABORATORIO DE ELECTROBOMBAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.

**AUTORES: CHRISTIAN ANDRÉS CARVAJAL MARTINEZ
JOSÉ LUIS POALACIN FLORES**

**DIRECTOR: ING. WILSON SÁNCHEZ
LATACUNGA**

2017



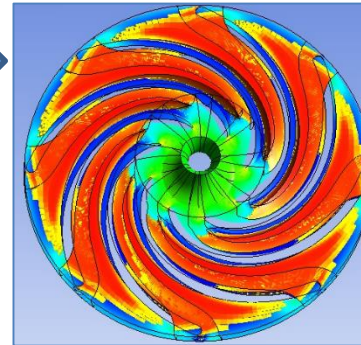
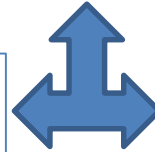
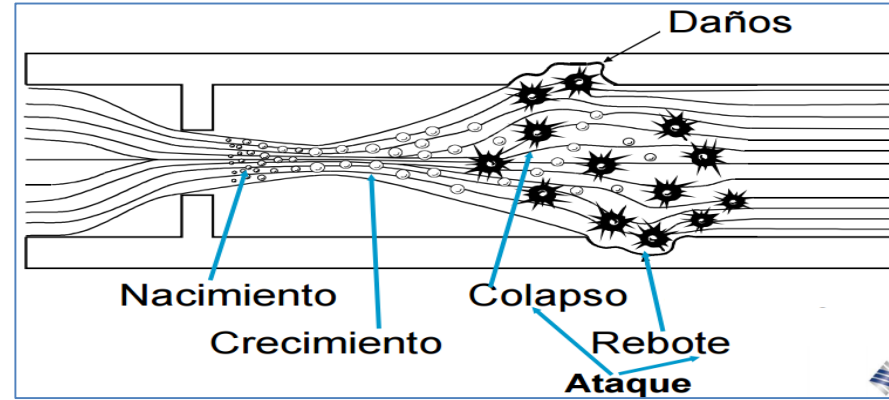
OBJETIVO GENERAL

- Analizar y evaluar el fenómeno de cavitación de un sistema de bombeo utilizando técnicas CFD y análisis modal para determinar su influencia en los parámetros de rendimiento energético en el laboratorio de electrobombas de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS EXTENSIÓN LATACUNGA.

INTRODUCCIÓN



CAVITACIÓN

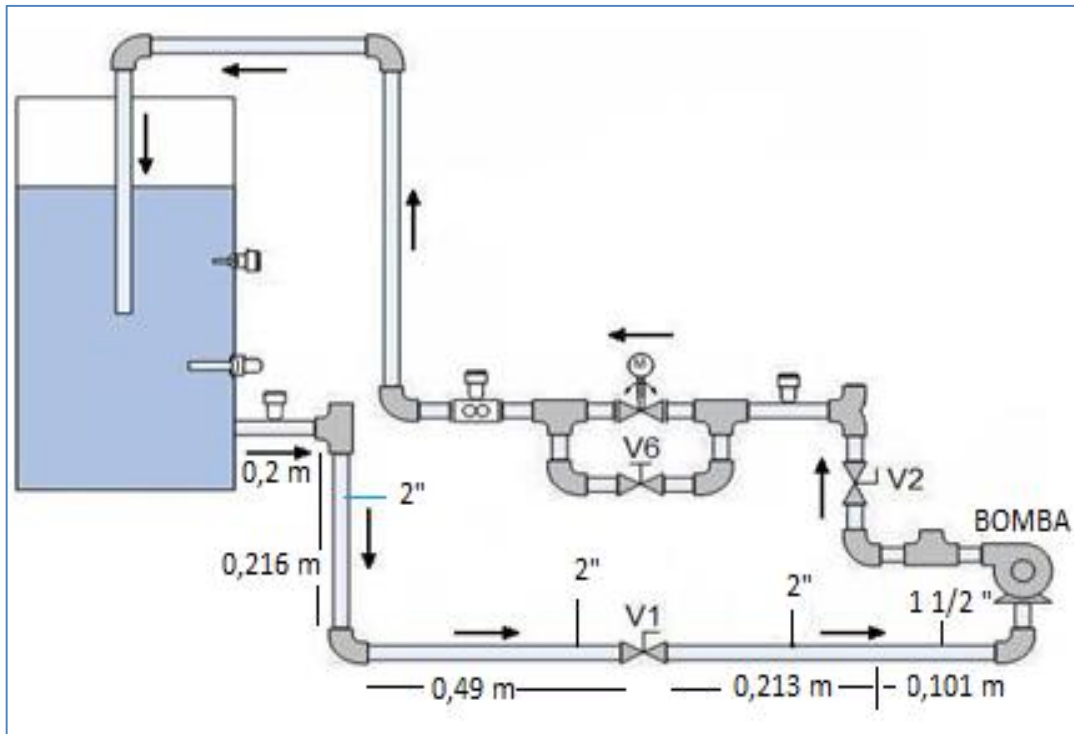


MANTENIMIENTO



1. ANÁLISIS DE BALANCE ENERGÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE $NPSH_{D1}$

CIRCUITO HIDRÁULICO



PROPIEDADES DEL FLUIDO

Temp. (°C)	Peso específico γ [KN/m^3]	Densidad ρ [Kg/m^3]	Viscosidad cinemática ν [m^2/s]
20	9,79	998	$1,02 \times 10^{-6}$
18	9,798	998,8	$1,072 \times 10^{-6}$
15	9,81	1000	$1,15 \times 10^{-6}$

DATOS BOMBA CENTRÍFUGA 3450 RPM

Bomba centrífuga 3450 rpm	
Caudal (Q)	77,9 GPM - $0,004915 \frac{m^3}{s}$
Presión de descarga (Pd)	6,2 psi – 42,75 KPa
Nivel del fluido (NR)	66,4 cm
Altura (m.c.a)	6,4 m.c.a



Velocidad del fluido v_2

$$v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

$$v_2 = 4,31 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds (N_{R2})

$$N_{R2} = \frac{v_1 * D_2}{\nu}$$

$$N_R = 153\,181,90$$

Factor de fricción (f_2)

$$f_2 = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{D_2}{\varepsilon} \right)} + \frac{5,74}{N_{R2}^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,01643$$

Pérdidas primarias totales (h_{LPT})

$$h_{LPT} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{LPT} = 0,1567 \text{ m}$$

Pérdidas secundarias en accesorios (h_{LS})

Accesorio	Número de elementos	K	Total
Válvula de bola DN 50 2"	1	0,05	0,05
Contracción Súbita	1	0,14	0,14
Uniones roscadas 2"	2	0,08	0,16
Uniones roscadas 1½"	1	0,08	0,08
Codo a 90° de radio largo	1	20 FT	20 FT
Té de paso ramal	1	60 FT	60 FT

$$h_{LS} = K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$h_{LS} = 0,599 \text{ m}$$

Pérdidas totales (h_f)

$$h_f = h_{LPT} + h_{LS}$$

$$h_f = 0,7557 \text{ m}$$



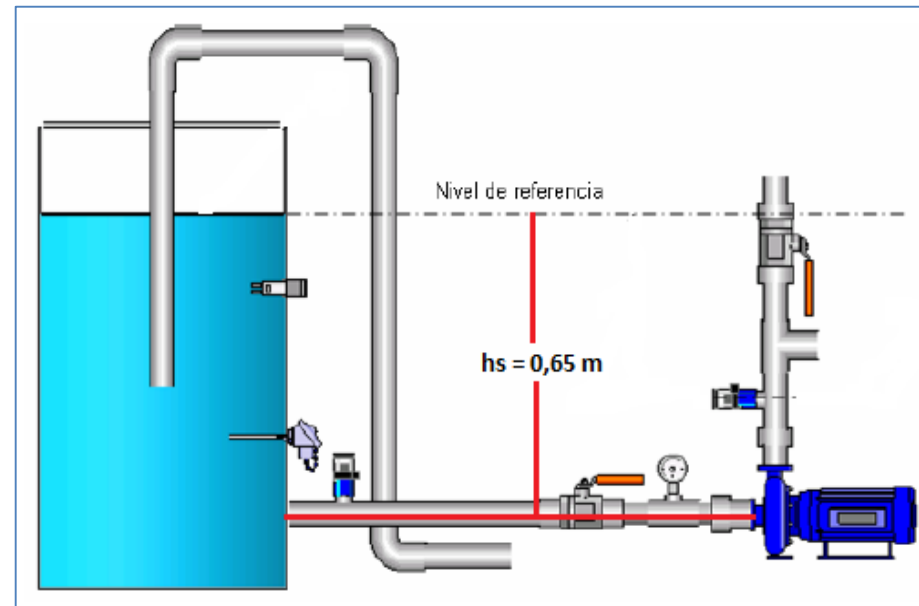
Carga de presión estática sobre el fluido (h_{sp})

Altitud (m)	Presión (KPa)
2850	78,1

$$h_{sp} = 78,1 \text{ Pa} \times 1000 \frac{1 \text{ plg } H_2O}{249 \text{ Pa}} \times \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ plg}}$$

$$h_{sp} = 8,00 \text{ m}$$

Diferencia de elevación (h_s)



$$h_s = 0,65 \text{ m}$$



Carga de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (h_{vp})

$$T = 18^{\circ}\text{C}$$
$$h_{vp} = 0,2161 \text{ m}$$

Potencia de activación (P_{ac})

$$P_{ac} = 1,19 \text{ HP}$$

Potencia útil (P_{ut})

$$P_{ut} = \gamma * H * Q$$
$$P_{ut} = 0,41 \text{ HP}$$

EFICIENCIA (E_b)

$$E_b(\%) = \frac{\text{Potencia útil } (P_{ut})}{\text{Potencia de activación } (P_{ac})}$$
$$E_b(\%) = 34,45 \%$$

Carga de succión neta positiva disponible ($NPSH_D$)

$$NPSH_{D1} = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \text{ [m]}$$
$$NPSH_{D1} = 8,00 + 0,65 - 0,7557 - 0,2161$$
$$NPSH_{D1} = 7,68 \text{ m}$$

2. ANÁLISIS DE BALANCE ENERGÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE $NPSH_{D2}$ EN CAVITACIÓN

DATOS BOMBA CENTRÍFUGA 3450 RPM

Bomba centrífuga 3450 rpm	
Caudal (Q)	46,6 GPM - $0,002938 \frac{m^3}{s}$
Presión de descarga (Pd)	2,8 psi – 19,31 KPa
Nivel del fluido (NR)	66,4 cm
Altura (m.c.a)	2,9 m.c.a



Pérdidas primarias
totales (h_{LPT})

$$\rightarrow h_{LPT} = 0,06 \text{ m}$$

Pérdidas
secundarias en
accesorios (h_{LS})

$$\rightarrow h_{LS} = 3,44 \text{ m}$$

Pérdidas totales
(h_f)

$$\rightarrow h_f = 3,50 \text{ m}$$



**CARGA DE SUCCIÓN NETA
POSITIVA DISPONIBLE ($NPSH_D$)**



$$NPSH_{D2} = 4,93 \text{ m}$$

POTENCIA DE ACTIVACIÓN (P_{ac})



$$P_{ac} = 0,80 \text{ HP}$$

POTENCIA ÚTIL (P_{ut})



$$P_{ut} = 0,11 \text{ HP}$$

EFICIENCIA (E_b)



$$E_b(\%) = 13,96 \%$$



3. INTERPRETACIÓN DE $NPSH_R$

$NPSH_R$ Bomba Centrífuga

$$NPSH_R = 7,28 \text{ m}$$

$NPSH_{R1}$ Bomba Centrífuga

$$NPSH_{R1} = \left(\frac{N2}{N1}\right)^2 * (NPSH_R)$$

$$NPSH_{R1} = \left(\frac{3450 \text{ rpm}}{3500 \text{ rpm}}\right)^2 * (6,82 \text{ m})$$

$$NPSH_{R1} = 6,62 \text{ m}$$

$NPSH_{R2}$ Bomba Centrífuga

$$NPSH_{R2} = 1.10 * (NPSH_{R1})$$

$$NPSH_{R2} = 1.10 * (6,62 \text{ m})$$

$$NPSH_{R2} = 7,28 \text{ m}$$

CONCLUSIÓN

Si $NPSH_D > NPSH_R$; no existe cavitación.

Por lo tanto: $NPSH_{D1} > NPSH_{R2}$

7,68 m > 7,28 m; **Estado 1 NORMAL**

Si $NPSH_D \leq NPSH_R$; si existe cavitación.

Por lo tanto: $NPSH_{D2} < NPSH_{R2}$

4,93 m < 7,28 m; **Estado 2 CAVITACIÓN**



4. APLICACIÓN DE TÉCNICAS (CFD)

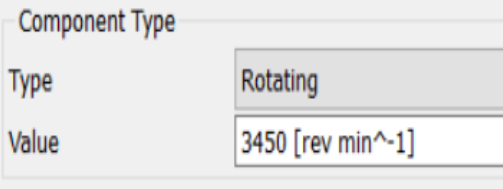
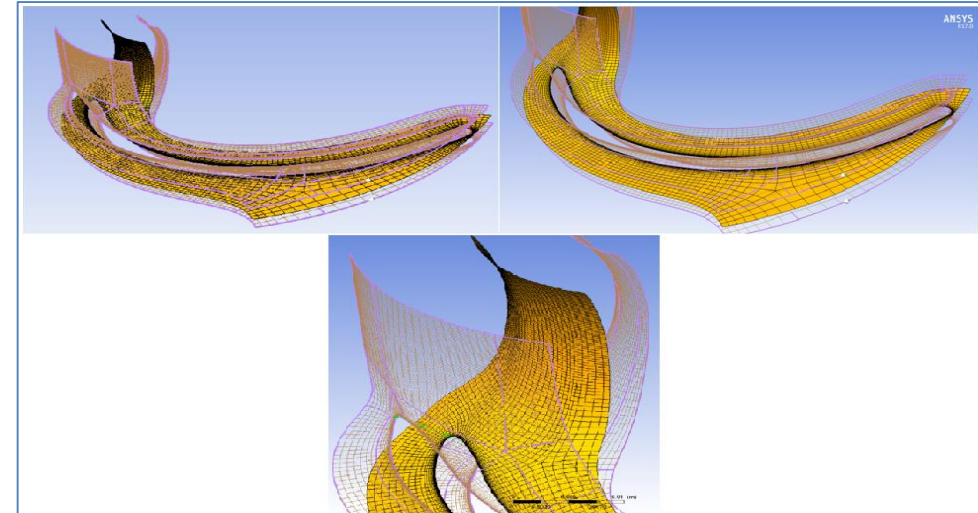
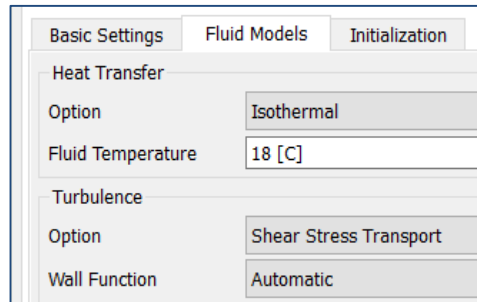
DISEÑO DE IMPULSOR



TURBOGRID

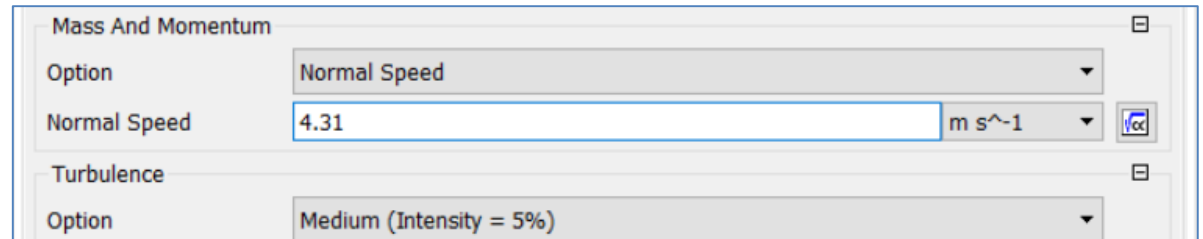
Method Global Size Factor
Size Factor 1.0

CONFIGURACIÓN DE DOMINIO



CONDICIÓN DE BORDE DE ENTRADA

$$I_{turb} = 3,59$$



CONDICIÓN DE BORDE DE SALIDA



Mass And Momentum	
Option	Static Pressure
Relative Pressure	42.75 kPa

CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Convergence Control	
Min. Iterations	1
Max. Iterations	1000

Convergence Criteria	
Residual Type	RMS
Residual Target	1.E-4

Fluid Timescale Control	
Timescale Control	Physical Timescale
Physical Timescale	0.0276 [s]

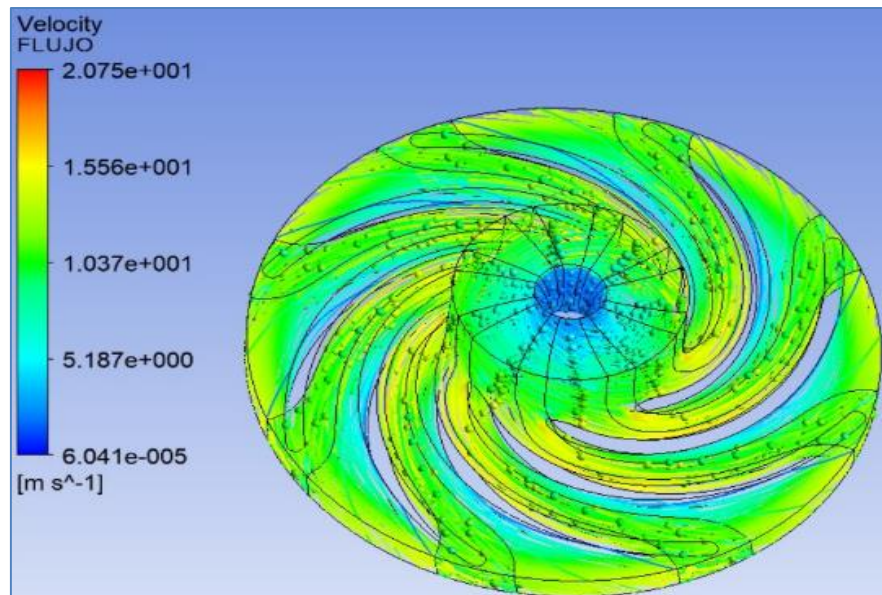
<input checked="" type="checkbox"/> Conservation Target	
Value	0.01



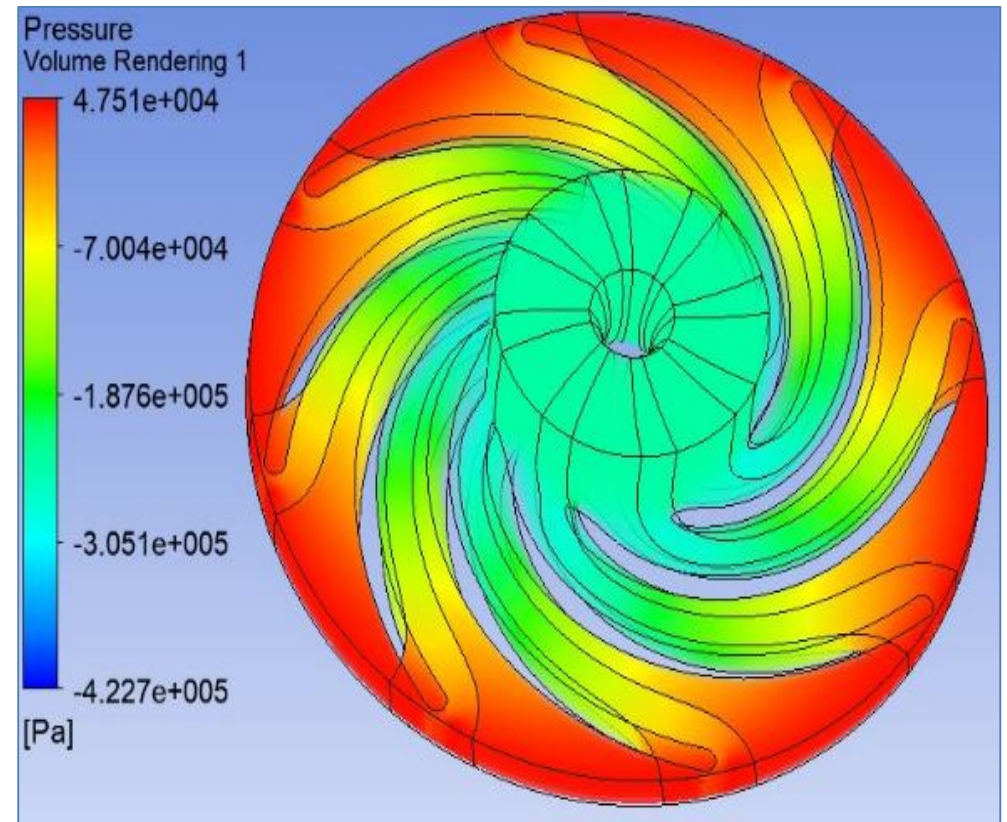
CALIDAD DE LA MALLA

Mesh Statistics									
Domain Name	Orthog. Angle	Exp. Factor	Aspect Ratio						
	Minimum [deg]	Maximum	Maximum						
R1	37.1 ok	5 ok	2197 OK						
	%! %ok %OK	%! %ok %OK	%! %ok %OK						
R1	0 2 98	0 <1 100	0 0 100						

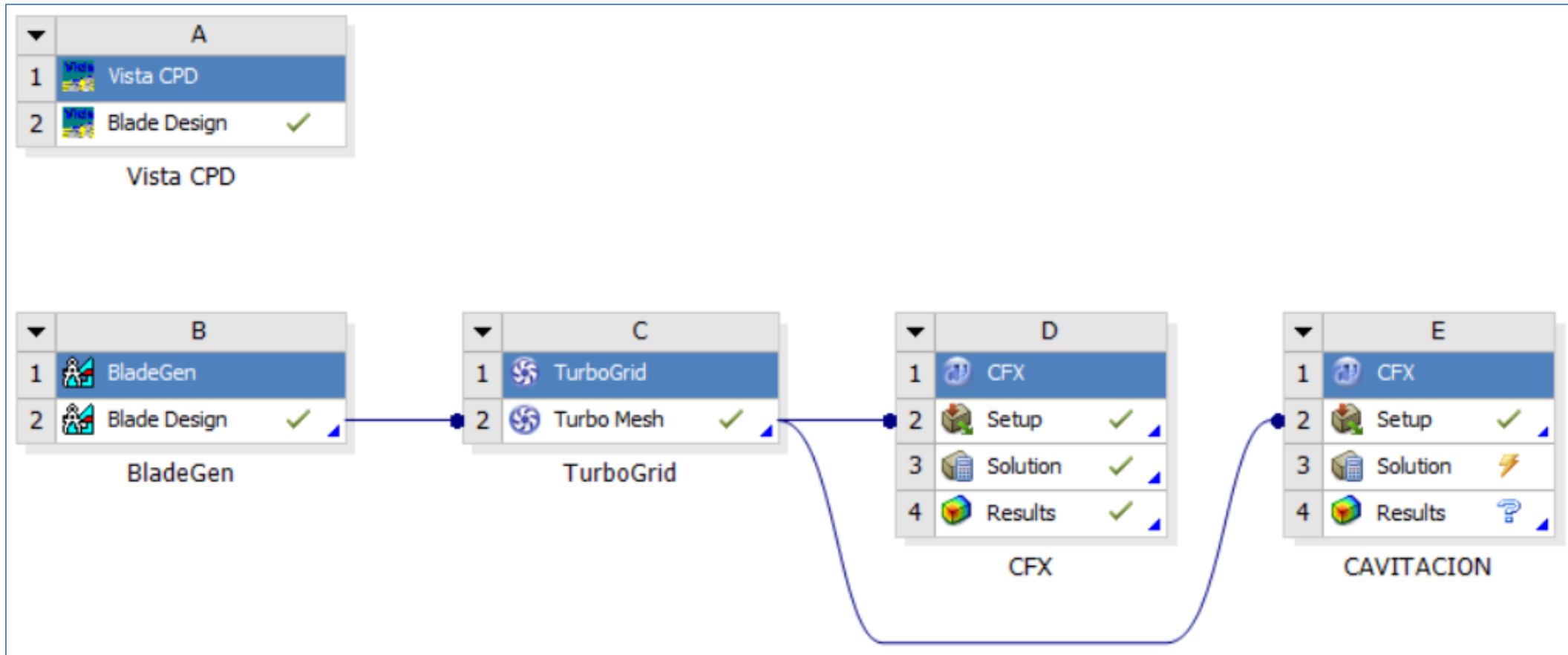
VELOCIDAD DEL FLUIDO



DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN



5. CFD – RÉGIMEN DE CAVITACIÓN



CONFIGURACIÓN DE DOMINIO



Mass Transfer
Option Cavitation

Saturation Pressure
Saturation Pressure

Boundary Conditions

VAPOR	
Water	

Water

Volume Fraction	
Option	Value
Volume Fraction	1



CONDICIÓN DE BORDE DE ENTRADA

VAPOR	
Water	

VAPOR

Volume Fraction	
Option	Value
Volume Fraction	0

CONDICIÓN DE BORDE DE SALIDA

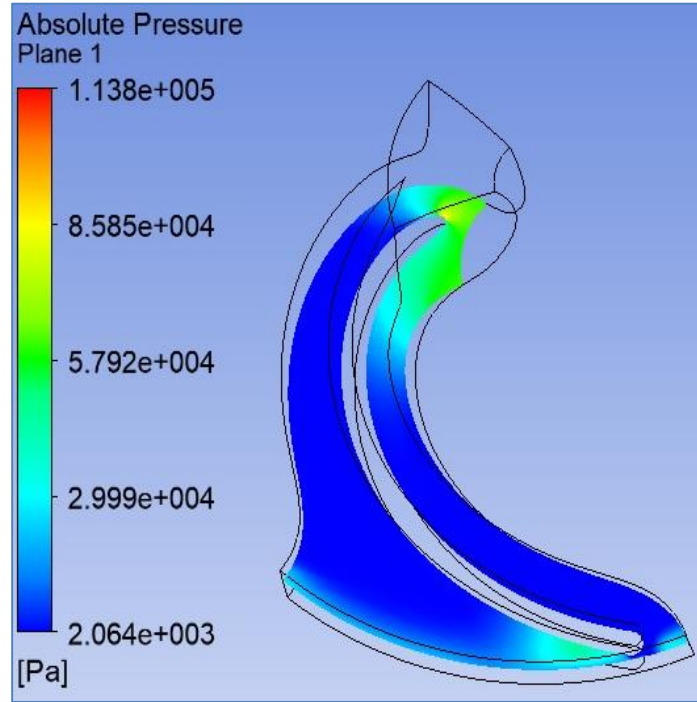


Mass And Momentum

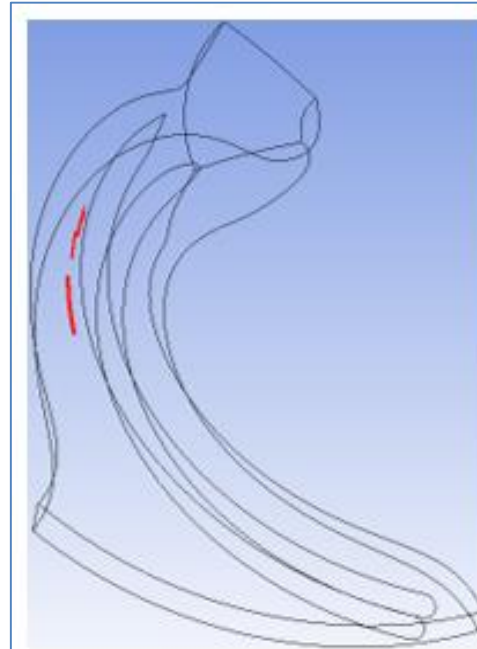
Option	Static Pressure
Relative Pressure	19.31 [kPa]



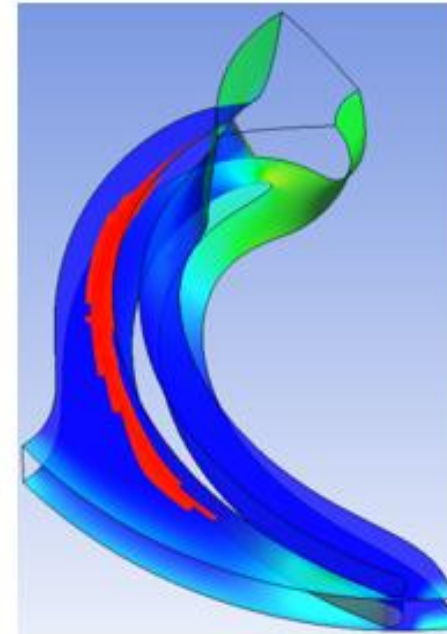
DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN



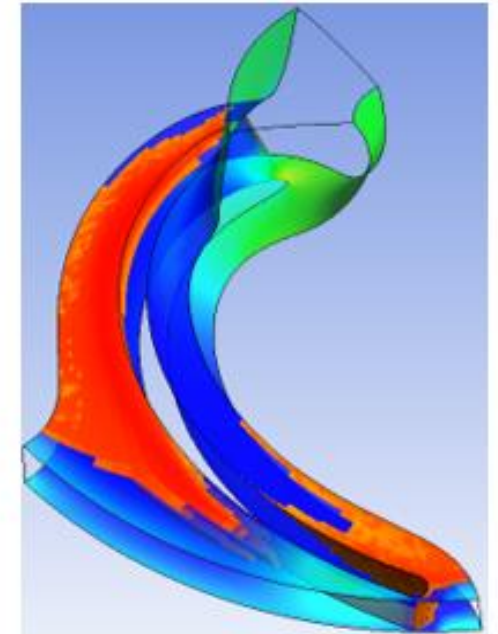
ETAPA DE SEVERIDAD



(a) Erosión leve



(b) Erosión media

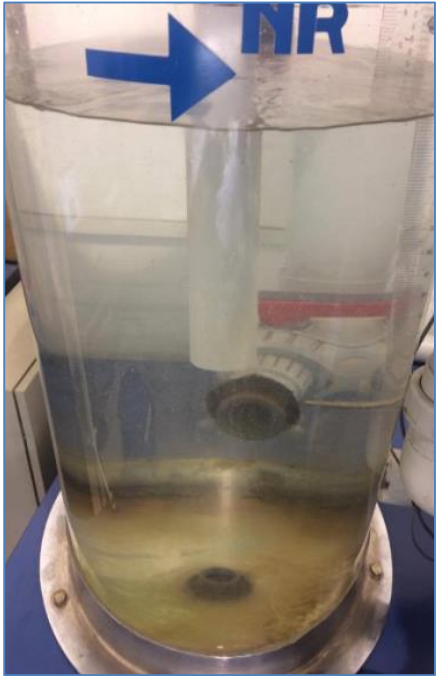
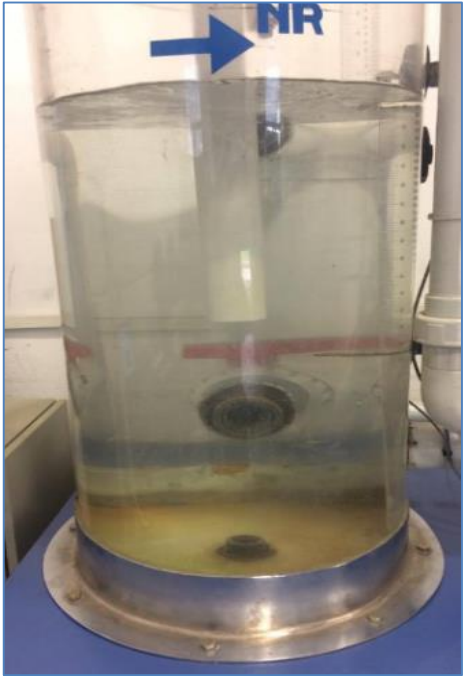


(c) Erosión avanzada

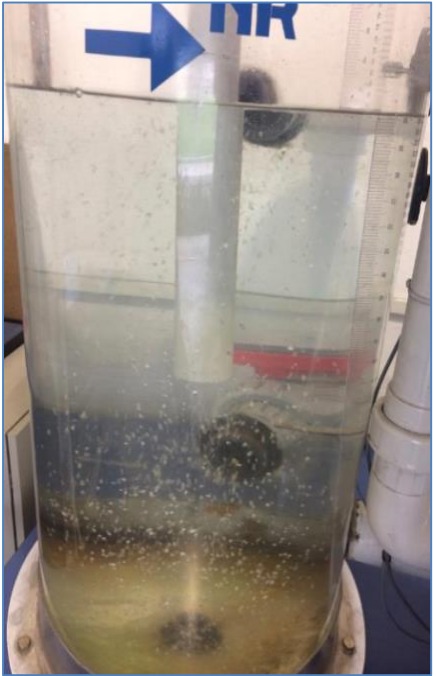


PRESENCIA DE CAVITACIÓN EN EL PROCESO

RÉGIMEN NORMAL



RÉGIMEN DE CAVITACIÓN



6. ANÁLISIS Y APLICACIÓN MODAL - VIBRACIONAL

Variables del sistema

Variable	Magnitud
Longitud (L)	0,218 m
Diámetro (D)	0,013 m
Módulo de Elasticidad (E)	207 GPa
Momento polar de Inercia (I)	$2,803 * 10^{-9} m^4$
Masa del eje (m)	1,5 Kg
Masa del rotor (M)	1,23 Kg

MOMENTO POLAR DE INERCIA

$$I = \frac{\pi D^4}{32}$$

$$I = 2,803 * 10^{-9} m^4$$

PUNTOS DE MASA

$$Pm 1 = 0,33 Kg$$

$$Pm 2 = 1,28 Kg$$

MOMENTO MÁSIICO DE INERCIA

$$I_c = \frac{1}{4} MD^2$$

$$I_{c1} = 13,94 kg \cdot mm^2$$

$$I_{c2} = 54,08 kg \cdot mm^2$$

FRECUENCIA CRÍTICA

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{48(E)(I)}{\left(M + \frac{17}{35}(m)\right)(L)^3}}$$

$$f_n = 186,45 Hz$$



7. ANÁLISIS Y APLICACIÓN MODAL – VIBRACIONAL EN ANSYS

PUNTOS DE MASA Y MOMENTO MÁSIICO DE INERCIA

Definition	
<input type="checkbox"/> Mass	0,33 kg
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia X	0, kg·mm ²
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia Y	0, kg·mm ²
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia Z	13,94 kg·mm ²

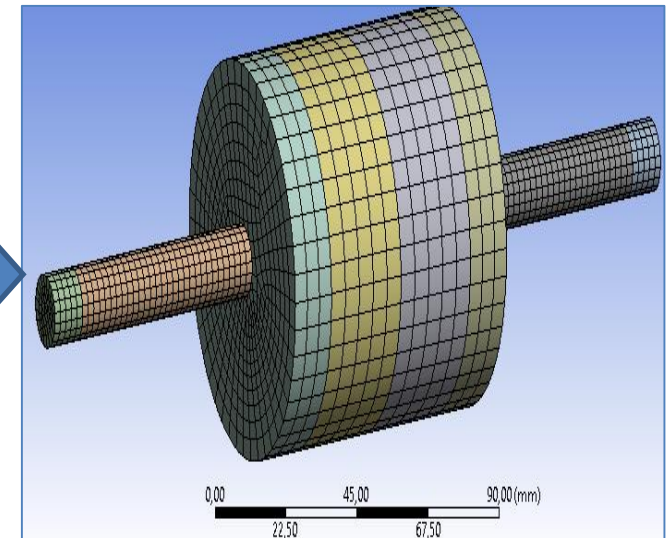
Definition	
<input type="checkbox"/> Mass	1,28 kg
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia X	0, kg·mm ²
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia Y	0, kg·mm ²
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia Z	54,08 kg·mm ²

B	
1	Modal
2	Engineering Data ✓
3	DM Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Solution ✓
7	Results ✓

Modal

Mallado

Details of "Sweep Method" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	8 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Method	Sweep
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Automatic
Source	Program Controlled
Target	Program Controlled
Free Face Mesh Type	Quad/Tri
Type	Number of Divisions



CALIDAD DE MALLADO



Parámetro	Recomendado por Software	Obtenido por simulación	Calidad de malla
Ortogonalidad	Promedio 1	Promedio 0,98	Excelente
Oblicuidad	Promedio 0	Promedio 0,15	Excelente

VELOCIDAD CRÍTICA



11030 rpm | 183,83 Hz

ERROR



$$error = \frac{VALOR\ CALCULADO - VALOR\ ANSYS}{VALOR\ CALCULADO} * 100\%$$

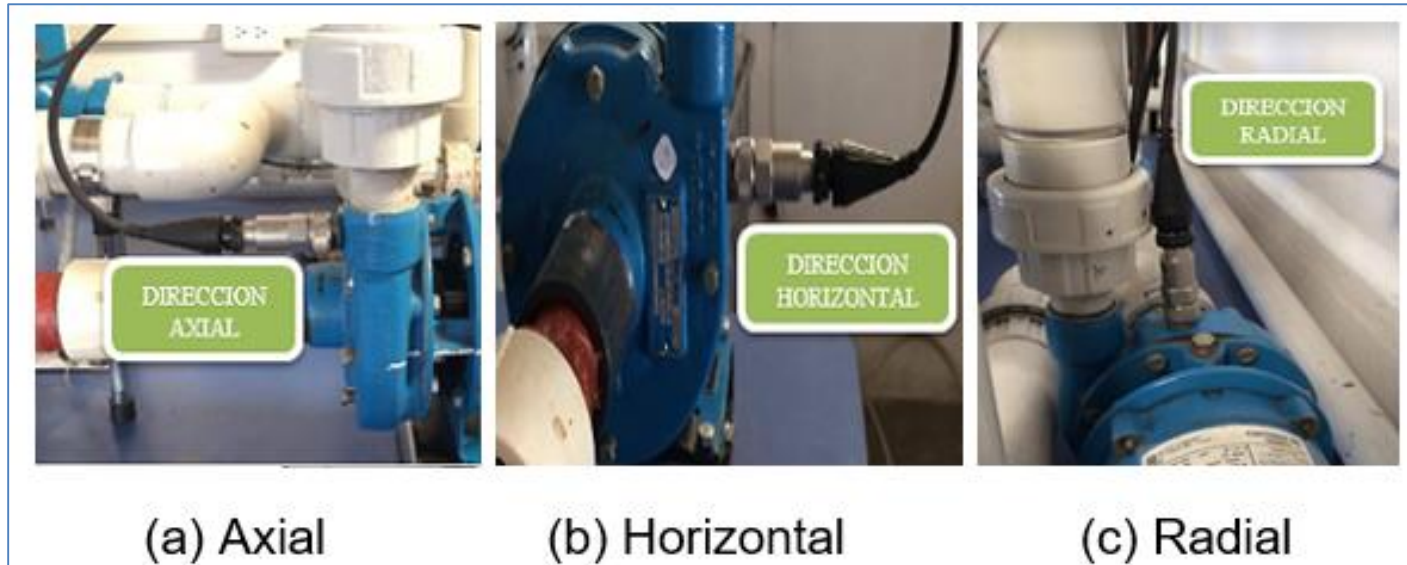


1,40 %

8. ADQUISICIÓN Y EVALUACIÓN DE DATOS CON EL ANALIZADOR IRD BALANCING



PUNTOS DE MEDIDA



FRECUENCIA DE PASO DE ÁLABE



$$BPF = 460 \text{ Hz}$$



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OPERACIÓN NORMAL

PUNTO	Velocidad de vibración RMS (mm/s)	SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN ISO 10816
PSR	2,72	INSATISFACTORIO
PSH	1,63	SATISFACTORIO
PSA	1,34	SATISFACTORIO
PDH	2,56	INSATISFACTORIO
PDA	1,83	SATISFACTORIO
PDR	1,61	SATISFACTORIO
PVH	1,55	SATISFACTORIO
PVA	1,18	SATISFACTORIO

OPERACIÓN EN CAVITACIÓN

PUNTO	Velocidad de vibración RMS (mm/s)	SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN ISO 10816
PSR	4,34	INSATISFACTORIO
PSH	2,74	INSATISFACTORIO
PSA	2,10	INSATISFACTORIO
PDH	2,42	INSATISFACTORIO
PDA	3,77	INSATISFACTORIO
PDR	2,43	INSATISFACTORIO
PVH	2,15	INSATISFACTORIO
PVA	2,54	INSATISFACTORIO

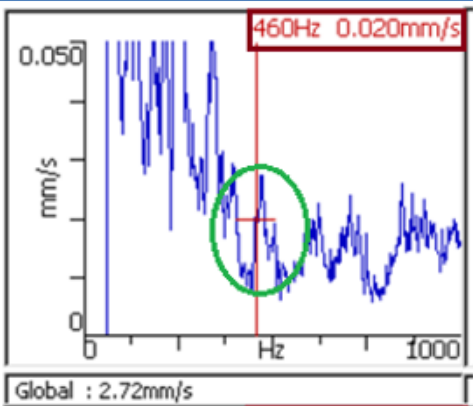
VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28	good		
	0.02	0.45			
	0.03	0.71			
	0.04	1.12	satisfactory		
	0.07	1.80			
	0.11	2.80	unsatisfactory		
	0.18	4.50			
	0.28	7.10	unacceptable		
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
0.71	28.0				
1.10	45.0				



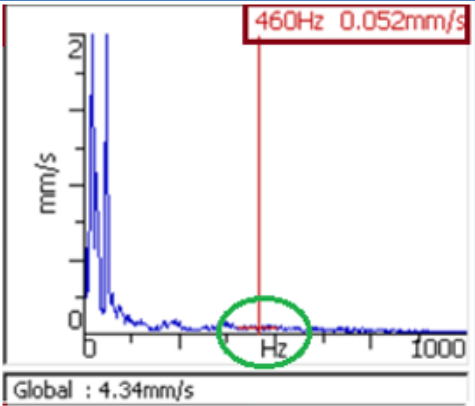
ESPECTROS DE FRECUENCIA EN SUCCIÓN

RADIAL

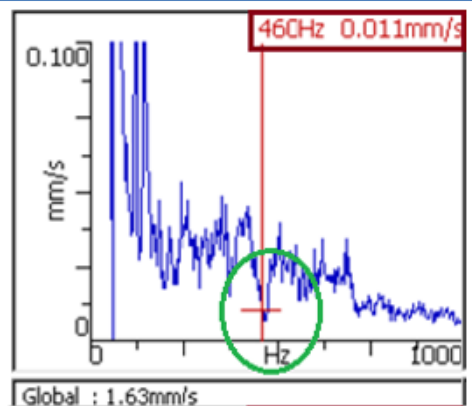
HORIZONTAL



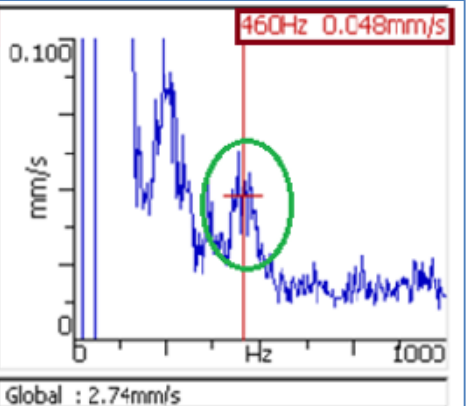
(a) Operación Normal



(b) Operación en Cavitación

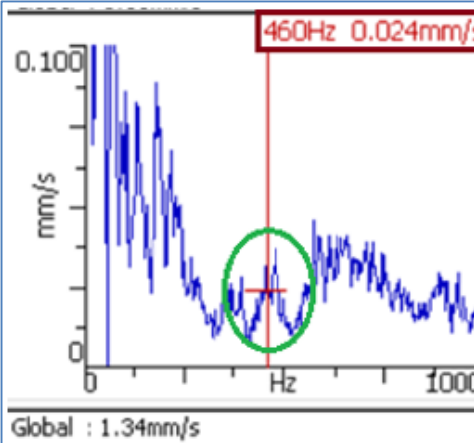


(a) Operación Normal

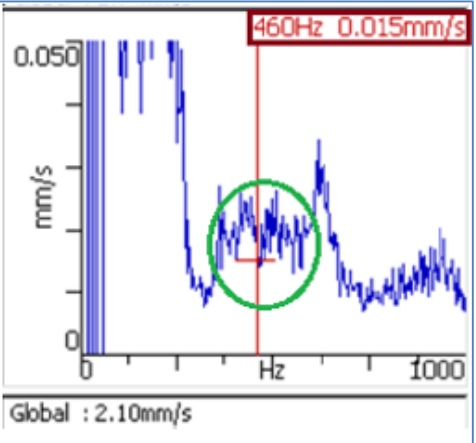


(b) Operación en Cavitación

AXIAL



(a) Operación Normal

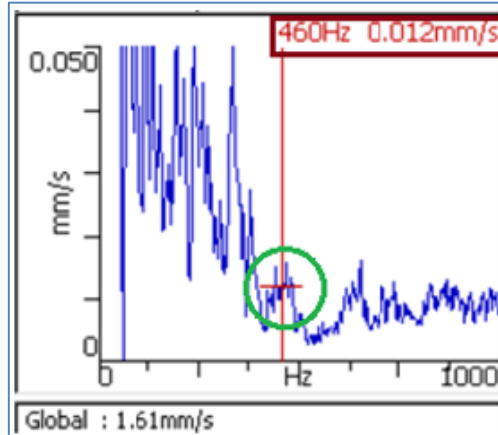


(b) Operación en Cavitación

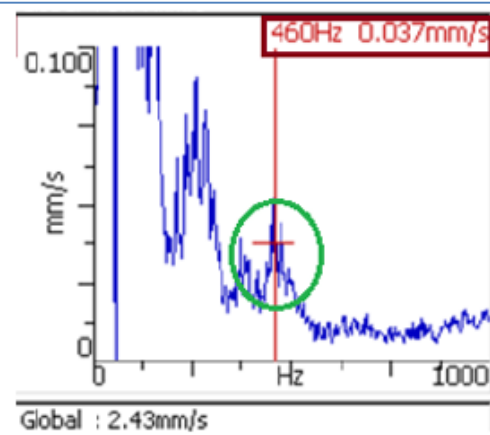


ESPECTROS DE FRECUENCIA EN DESCARGA

RADIAL

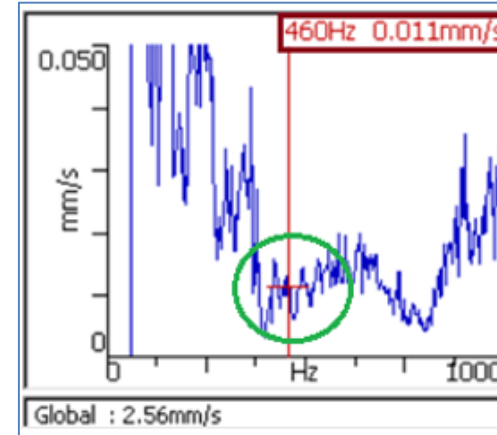


(a) Operación Normal

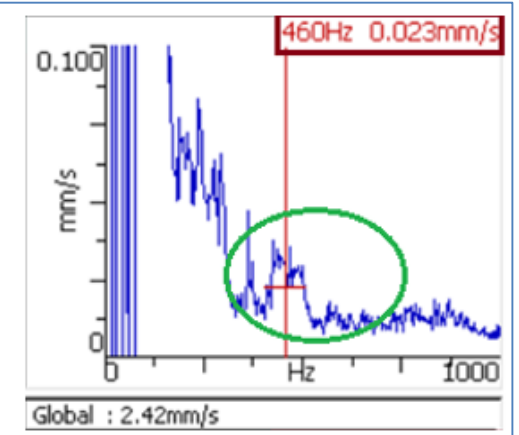


(b) Operación en Cavitación

HORIZONTAL

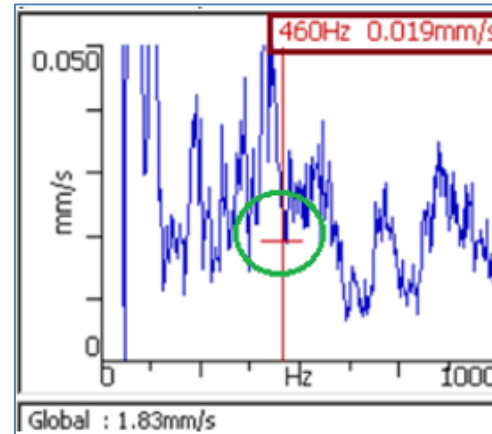


(a) Operación Normal

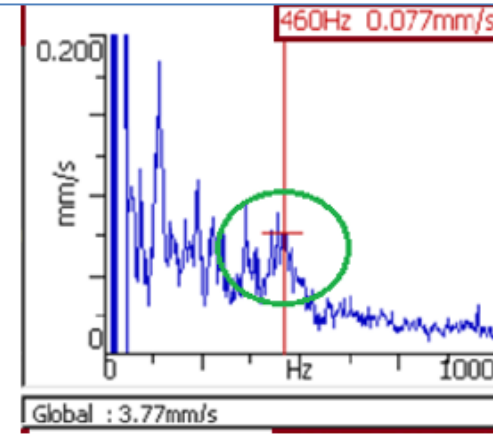


(b) Operación en Cavitación

AXIAL



(a) Operación Normal



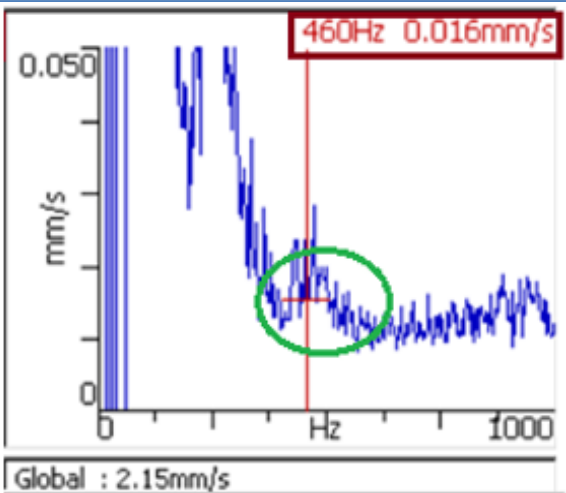
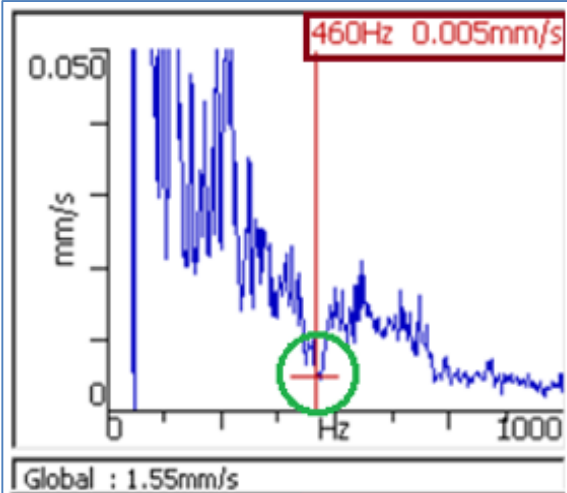
(b) Operación en Cavitación



ESPECTROS DE FRECUENCIA EN LA VOLUTA

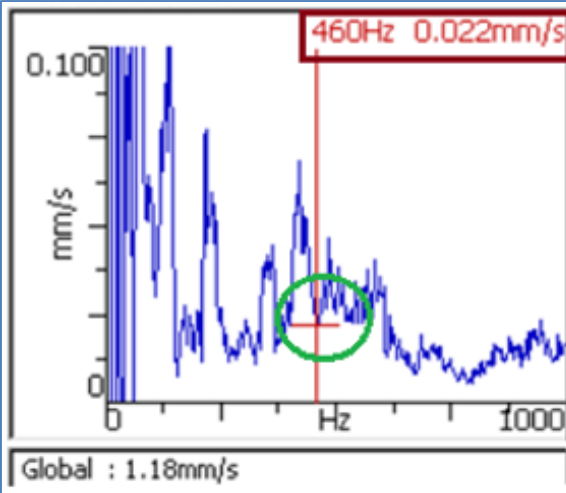
HORIZONTAL

AXIAL

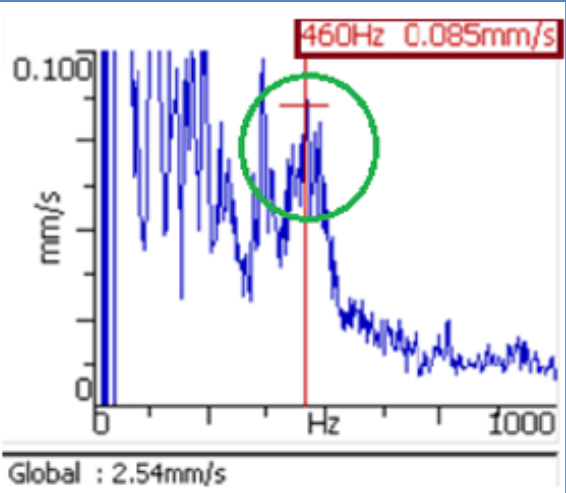


(a) Operación Normal

(b) Operación en Cavitación



(a) Operación Normal



(b) Operación en Cavitación



9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON PROGRAMA SPSS PARA LA EVALUACIÓN DE CAVITACIÓN EN LOS PARÁMETROS DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO

PRUEBA T-STUDENT
PARA MUESTRAS
RELACIONADAS

NIVEL DE
SIGNIFICANCIA

$$\alpha=0,05$$

HIPÓTESIS Ho: El análisis del fenómeno de cavitación en un sistema de bombeo no permite evaluar su influencia en los parámetros de rendimiento energético.

HIPÓTESIS Ha: El análisis del fenómeno de cavitación en un sistema de bombeo permite evaluar su influencia en los parámetros de rendimiento energético.

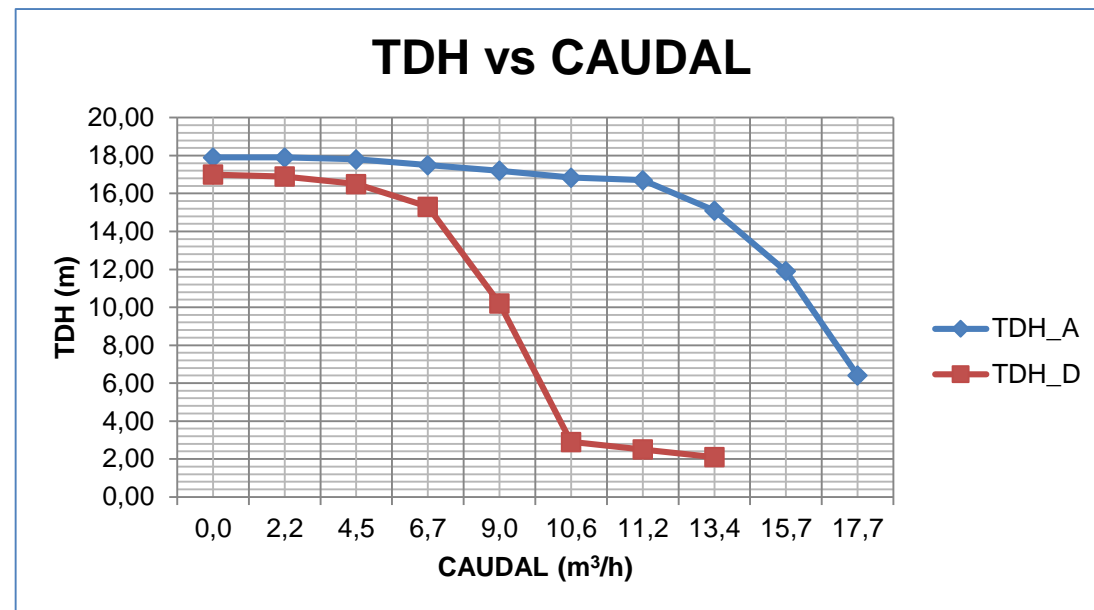
REGLA DE DECISIÓN



Si $p < 0,05$ se acepta H_a y se rechaza H_o

ALTURA DE IMPULSIÓN TDH

Evaluación de datos de altura de impulsión (TDH)			
Nº	CAUDAL (Q) m ³ /h	TDH ANTES (m.c.a)	TDH DESPUÉS (m.c.a)
1	0,00	17,90	17,00
2	2,24	17,90	16,90
3	4,48	17,80	16,50
4	6,72	17,50	15,30
5	8,95	17,20	10,20
6	10,58	16,84	2,90
7	11,19	16,70	2,50
8	13,43	15,10	2,10



Prueba de muestras emparejadas

	Diferencias emparejadas						t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia					
				Inferior	Superior				
Par 1 TDH_ANTES (m.c.a) - TDH_DESPUES (m.c.a)	6,69250	6,14105	2,17119	1,55846	11,82654	3,082	7	,018	

0,018 < 0,05



ACEPTA H_a



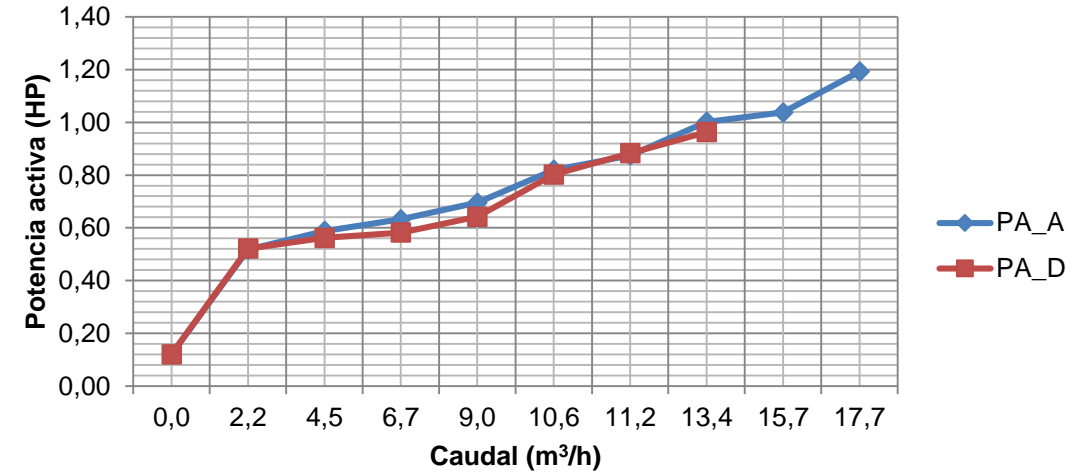
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

POTENCIA ACTIVA (Pac)

Evaluación de datos de potencia de entrada (Pac)

Nº	CAUDAL (Q) m ³ /h	Pac_ANTES (HP)	Pac_DESPUÉS (HP)
1	0,00	0,12	0,12
2	2,24	0,52	0,52
3	4,48	0,59	0,56
4	6,72	0,63	0,58
5	8,95	0,70	0,64
6	10,58	0,82	0,80
7	11,19	0,87	0,88
8	13,43	1,00	0,96

POTENCIA ACTIVA vs CAUDAL



Prueba de muestras emparejadas

	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Par 1 Pat_ANTES (HP) - Pat_DESPUES (HP)	,02375	,02560	,00905	,00235	,04515	2,624	7	,034

$0,034 < 0,05$



ACEPTA Ha



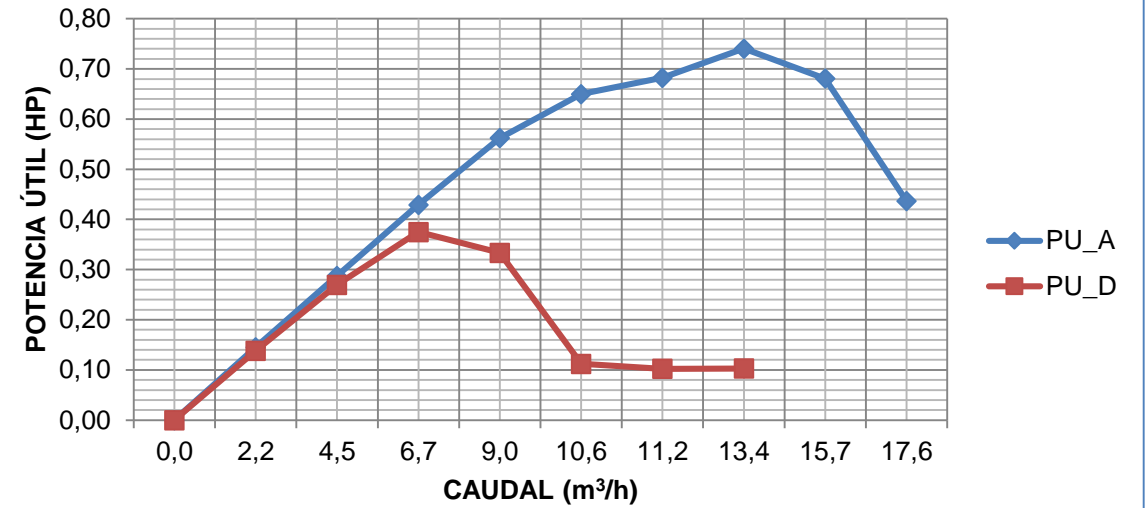
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

POTENCIA ÚTIL (Put)

Evaluación de datos de potencia útil (Put)

Nº	CAUDAL (Q) m³/h	Put_ANTES (HP)	Put_DESPUÉS (HP)
1	0,00	0,00	0,00
2	2,24	0,15	0,14
3	4,48	0,29	0,27
4	6,72	0,43	0,38
5	8,95	0,56	0,33
6	10,58	0,65	0,11
7	11,19	0,68	0,10
8	13,43	0,74	0,10

POTENCIA ÚTIL vs CAUDAL



Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas				t	gl	Sig. (bilateral)	
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior				Superior
Par 1	Put_ANTES (HP) - Put_DESPUES (HP)	,25875	,28231	,09981	,02273	,49477	2,592	7	,036

$0,036 < 0,05$



ACEPTA Ha



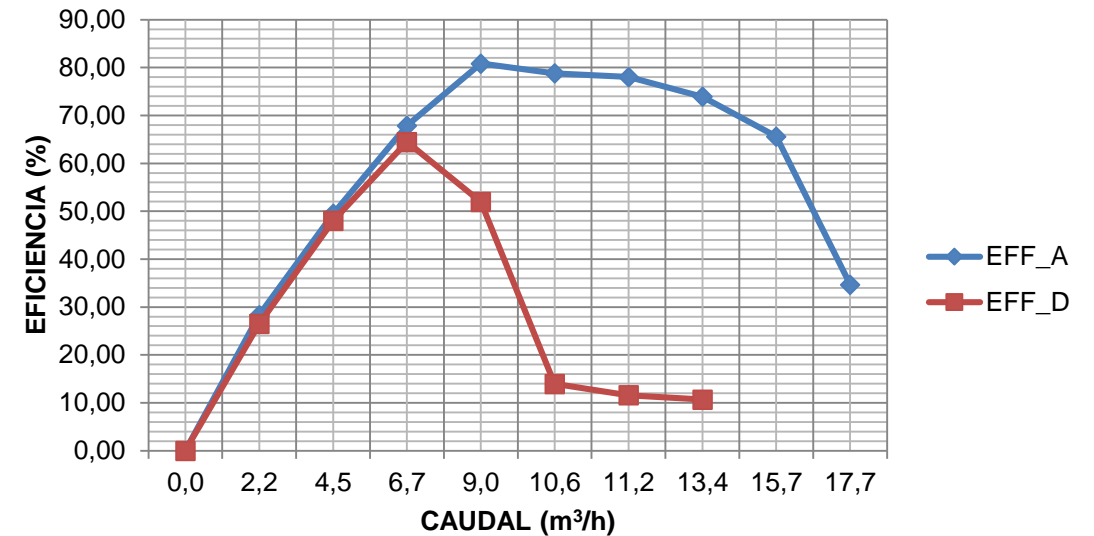
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

EFICIENCIA (Eb)

Evaluación de datos de eficiencia (Eb)

Nº	CAUDAL (Q) m³/h	Eb_ ANTES (%)	Eb_ DESPUÉS (%)
1	0,00	0,00	0,00
2	2,24	28,31	26,49
3	4,48	49,45	48,00
4	6,72	67,88	64,47
5	8,95	80,83	51,94
6	10,58	78,79	13,96
7	11,19	78,03	11,57
8	13,43	73,91	10,69

EFICIENCIA vs CAUDAL



Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	Eb_ ANTES (%) - Eb_ DESPUES (%)	28,76000	31,28487	11,06087	2,60519	54,91481	2,600	7	,035

0,035 < 0,05



ACEPTA Ha



HOJA DE TRABAJO DE INFORMACION RCM

ELEMENTO: Sistema de bombeo

Realizado por: Christian Carvajal
José Luis Poalacín

Fecha:
01/03/2017

Hoja: 1

COMPONENTE: Bomba Centrífuga

Revisado por: Ing. Wilson Sánchez

Fecha:
01/03/2017

De: 10



FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS	
1	Bombear agua desde el punto A hasta el punto B a velocidades de 2950,3200 y 3450 rpm	A	Incapaz de bombear agua	1	Impulsor desgastado por cavitación. La falla se produce porque el impulsor está trabajando bajo efectos de cavitación, lo que provoca una disminución de la altura de impulsión, no causa daño al medio ambiente y al ser humano. El tiempo de reparación del impulsor se estima en 1 mes.
				2	Tubería de succión tapada debido a sedimentos existentes en el fluido. Este tipo de falla se produce por la presencia de objetos extraños en la tubería de succión, obstruyendo el paso del fluido, la falla no causa daño al medio ambiente ni al ser humano. El tiempo de reparación se estima en 1 día
				3	Falla eléctrica del motor, por mala conexión de las fases. Se produce por falla eléctrica en el motor, por cortocircuito entre bobinas, conductores desgastados. Tiempo de reparación se estima en 5 días
				4	Válvulas V1 o V5 de entrada cerradas. La falla se produce debido a que las válvulas V1 y V5 están cerradas, debido a la operación manual incorrecta. El tiempo de reparación se estima en 20 minutos
				5	Rodamientos desgastados por cavitación. El desgaste de rodamientos se da por el desbalance del eje del motor, el cual se encuentra vibrando por presencia del fenómeno de cavitación, el técnico debe analizar esta falla con el analizador de vibraciones o por medio del ruido que provoca la máquina. El tiempo estimado de reparación se estima en 15 días.

HOJA DE TRABAJO DE DECISIÓN RCM
ELEMENTO: SISTEMA DE BOMBEO
Realizado por:
 Christian Carvajal
 José Luis Poalacín

Fecha:
 01/03/2017

Hoja: 1
COMPONENTE:
Revisado por:
 Ing. Wilson Sánchez

Fecha:
 01/03/2017

De: 6

REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS "A FALTA DE"			TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4			
							O1	O2	O3						
1	A	1	S	N	N	S	N	N	S				Cambio del impulsor	2 años	Técnico Mecánico
1	A	2	N				S						Liberar las tuberías y limpiarlas por dentro	2 años	Operador
1	A	3	S	S			S						Revisar cortocircuito entre bobinas y desbloquear el rotor	Semestral	Técnico Eléctrico
1	A	4	S	N	N	S	S						Verificación del circuito hidráulico de acuerdo al manual de operación	Diario	Operador
1	A	5	N				S						Cambio de rodamientos	Anual	Técnico Mecánico

CONCLUSIONES

- Con la metodología implementada de técnicas CFD y modal-vibracional, se analizó y evaluó el fenómeno de cavitación en un sistema de bombeo en el laboratorio de Electrobombas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, y se llegó a determinar su influencia en los parámetros de rendimiento energético.
- Para analizar el fenómeno de cavitación en el ojo del impulsor del sistema de bombeo, se procedió a cerrar la válvula de bola V1 45°, que se encuentra en la tubería de succión para crear un vacío que exceda la presión de vapor del fluido bombeado, registrando experimentalmente la reducción de presión en la descarga de 42,75 KPa a 19,31 KPa.

- En el modelo de cavitación de Ansys 17.2, se crea el módulo de vapor, con una temperatura del fluido presente en el experimento de 18°C y presión de descarga de 19,31 KPa; una vez obtenida la convergencia de las ecuaciones, se pudo observar la distribución de presión de 2064 Pa en los álabes que indican la formación y posterior implosión de burbujas de vapor, además zonas de color rojo en el ojo del impulsor que son conocidas como erosión leve, media y avanzada, provocando un desgaste en la superficie del mismo.
- La causa que produce la cavitación en el ojo del impulsor es la insuficiente carga de succión neta positiva disponible $NPSH_D$, que pasó de 7,68 m a 4,93 m; éste último al ser comparado con la carga de succión requerida $NPSH_R$ en régimen de cavitación se demostró la presencia de éste fenómeno, además se presentaron alteraciones vibratorias registradas mediante el análisis modal de vibraciones del IRD Balancing con rangos de severidad insatisfactorios según la norma ISO 10816, disminución de la capacidad de bombeo de 77,9 GPM a 46,6 GPM, disminución de la altura de impulsión de 6,4 metros de columna de agua a 2,9 metros de columna de agua, sonidos fuertes y presencia de burbujas en el tanque de almacenamiento.

- Mediante el análisis modal de vibraciones se adquirió datos de velocidad de vibración, que regidos a la norma ISO 10816, se logró evaluar el efecto que tiene la cavitación en el sistema de bombeo, donde la medición en los puntos de succión, descarga y voluta arrojaron valores de severidad insatisfactorios mayores a 1,83 mm/s.
- En el análisis modal de vibraciones del conjunto eje-rotor mediante el modelo matemático se obtuvo una frecuencia crítica de 186,45 Hz y con la aplicación del software Ansys 17.2 un valor de 183,83 Hz, registrando un error del 1,40%; además se registró velocidades de 11018 RPM y 11030 RPM que de manera experimental en los variadores de frecuencia altivar 11 es imposible establecerlas ya que el mismo registra una velocidad máxima de 3450 RPM.

- Con la aplicación de la prueba “t” de Student para muestras relacionadas se determinó que el régimen de cavitación afecta a los parámetros de rendimiento energético como son la altura, potencia útil, potencia activa y rendimiento, donde la estimación del p-valor fueron menores que el nivel de significancia del 5% demostrados mediante la utilización del software SPSS.
- Se logró desarrollar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, que permitirá a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas diagnosticar de manera precisa el daño que se presente a futuro en el sistema de bombeo.

RECOMENDACIONES

- Capacitar adecuadamente en el manejo e interpretación de CFD, que es una herramienta informática muy poderosa para el control y prevención de fenómenos generados por fluidos.
- Los resultados experimentales no serán reemplazados por los del software ya que el mismo me permite tener una aproximación a la respuesta real siempre y cuando se tenga conocimiento del mismo.
- Incluir un dispositivo de análisis modal de vibraciones en el sistema de bombeo que permita el monitoreo de frecuencias críticas y velocidades de vibración en la pantalla touch.

- Se recomienda que el laboratorio de Electrobombas de la Universidad de las Fuerzas Armadas sea utilizado para el fin de promover el aprendizaje de los estudiantes de la universidad y el mismo preste sus instalaciones para lo antes mencionado y no para fines diferentes.