



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ESTUDIO NUMÉRICO Y SIMULACIÓN PARA LA TOMA DE DATOS DE IMPACTO DEBIDO AL COLAPSO DE CAVIDADES SOBRE SUPERFICIES BAJO CONDICIONES DE FLUJO CAVITATIVO”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

JUMBO AVILA ANDERSON RAPHAEL

anderson.jumbo@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. HIDALGO DÍAZ VÍCTOR HUGO, DSc.

victor.hidalgo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. RODAS BENALCAZAR ANA VERONICA MSc.

ana.rodas@epn.edu.ec

Quito, agosto de 2018

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **ANDERSON RAPHAEL JUMBO ÁVILA**, bajo nuestra supervisión.

Ing. Víctor Hugo Hidalgo, DSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Ana Verónica Rodas, MSc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Anderson Raphael Jumbo Ávila**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Anderson R. Jumbo A.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Quimena y Marcial, que siempre me han brindado su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos César, Raúl, Bryan, Juan y Alisson, que han estado a mi lado a pesar de los problemas y dificultades.

A todos mis amig@s, sin excluir a ninguno, pero en especial a Rous, Kathys, Julio, Gabriel, por todos esos momentos que hemos pasado juntos y han estado conmigo, aunque sea solo para joder.

A mis directores de tesis Víctor Hidalgo y Ana Rodas, quienes con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación han logrado que pueda terminar con éxito mis estudios.

También a la Facultad de Ingeniería Mecánica, que me formó como profesional.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de tablas.....	viii
Glosario de términos.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Alcance	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Conceptos básicos	3
1.1.1. Cavitación	3
1.1.2. Número de cavitación	3
1.1.3. Núcleos de cavitación	4
1.1.4. Colapso de la burbuja	5
1.1.5. Parámetros que producen cavitación	6
1.2. Tipos de cavitación	6
1.2.1. Supercavitación.....	7
1.2.2. Cavitación de lámina (Partial cavitation).....	8
1.2.3. Cavitación de hilo	9
1.2.4. Cavitación de vórtice	10
1.3. Efectos de la cavitación	11
1.3.1. Ruido producido por cavitación	11
1.3.2. Aparición de fuerzas adicionales.....	12
1.3.3. Erosión por cavitación.....	12
1.4. Investigaciones realizadas.....	13
1.5. Sensores para medición de esfuerzos	14
1.5.1. Sensores Piezoeléctricos	15
1.5.2. Sensores piezoresistivos.....	16
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1. Presiones en el sistema.....	17
2.1.1. Antecedentes	17
2.1.2. Descripción de Paraview.....	19
2.1.3. Funciones de Paraview usadas.....	19
2.1.4. Descripción del ala y condiciones iniciales	20

2.1.5.	Zonas de presión máxima	21
2.1.6.	Tamaño del sensor	23
2.2.	Sensores	24
2.2.1.	Número de sensores y ubicación	24
2.2.2.	Recubrimiento de un sensor.....	25
2.3.	Simulación del sensor.....	26
2.3.1.	Sensor piezoeléctrico PVDF.....	26
2.3.2.	Sensor piezoresistivo de manganina.....	29
2.4.	Acondicionamiento de los sensores.....	31
2.4.1.	Sensor piezoeléctrico PVDF.....	31
2.4.2.	Sensor piezoresistivo de manganina.....	34
2.5.	Tarjeta de adquisición de datos	37
2.6.	Ambiente de simulación.....	38
2.7.	Evolución del área afectada.....	40
2.8.	Análisis de costos	42
2.9.	Evaluación y selección de la mejor alternativa.....	43
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1.	Graficas usando sensores PVDF	46
3.2.	Graficas usando sensores piezoresistivos de manganina.....	48
3.3.	Análisis espectral.....	49
3.4.	Selección de la mejor alternativa	50
3.5.	Evolución del área afectada por la cavitación	51
3.6.	Comparación para validación	51
3.6.1.	Antecedentes	51
3.6.2.	Validación	52
3.6.3.	Comparación.....	54
4.	CONCLUSIONES	55
	Referencias Bibliográficas	57

Índice de Figuras

Figura 1.1. Diferencia entre proceso de cavitación y ebullición.	3
Figura 1.2. Proceso de evolución de los núcleos.	5
Figura 1.3. Clasificación de los tipos de cavitación.	7
Figura 1.4. Proceso de supercavitación en un torpedo.	8
Figura 1.5. (a) Cavitación parcial, (b) Supercavitación.	9
Figura 1.6. Región de cierre de una cavitación parcial.	9
Figura 1.7. Transformación de la estela durante la cavitación.	10
Figura 1.8. Cavitación de vórtice en el tubo de aspiración de una turbina Francis.	11
Figura 1.9. Señales acústicas producidas por la cavitación.	11
Figura 1.10. Efectos de elevación y arrastre. a) Previo a la cavitación. b) Cavitación desarrollada.	12
Figura 1.11. Cuadro de selección del sensor.	14
Figura 1.12. Clasificación de los sensores estudiados.	15
Figura 1.13. Ilustración de una galga PVDF.	16
Figura 1.14. Sensor piezoresistivo.	16
Figura 1.15. Sensor piezoeléctrico de manganina.	16
Figura 2.1. Diagrama de flujo de la medición de presiones de impacto.	17
Figura 2.2. Validación del modelo de erosión propuesta por Hidalgo.	18
Figura 2.3. Diagrama del proceso de obtención de la presión del jet.	18
Figura 2.4. Ala convexa sola.	20
Figura 2.5. Ala convexa con obstáculo.	20
Figura 2.6. Diagrama de presiones máximas.	22
Figura 2.7. Valore máximos de presiones de impacto sobre el ala.	22
Figura 2.8. Zona de presiones máximas.	22
Figura 2.9. Relación entre tamaño del transductor y tamaño de la burbuja que colapsa.	23
Figura 2.10. Variación del valor del impacto con el tamaño del transductor.	23
Figura 2.11. Zonas de ubicación del sensor. Medidas en mm y se cumple el criterio espejo.	25
Figura 2.12. Efecto de las cintas de protección en la distribución de los pulsos.	25
Figura 2.13. Diagrama de flujo de simulación de los sensores.	26
Figura 2.14. Diagrama de flujo del proceso de Newton-Raphson.	27
Figura 2.15. Gráfica de carga vs. tiempo del sensor 1.	28
Figura 2.16. Gráfica de carga vs. tiempo del sensor 2.	29
Figura 2.17. Gráfica de resistencia vs. tiempo del sensor piezoresistivo 1 de manganina.	30
Figura 2.18. Gráfica de resistencia vs. tiempo del sensor piezoresistivo 2 de manganina.	31
Figura 2.19. Proceso de acondicionamiento del sensor PVDF.	32
Figura 2.20. Amplificador de carga ideal.	32
Figura 2.21. Diagrama de un integrador de carga real.	32
Figura 2.22. Integrador de carga modelo CI-50-0.1.	33
Figura 2.23. Gráfica de voltaje vs. tiempo del sensor 1.	34
Figura 2.24. Grafica de voltaje vs. Tiempo del sensor 2.	34
Figura 2.25. Acondicionamiento sensor piezoresistivo de manganina.	35
Figura 2.26. Fuente de pulsos piezoresistiva CK2-50.	35
Figura 2.27. Puente del circuito utilizado en la fuente de pulsos.	35
Figura 2.28. Gráfica Voltaje vs. tiempo. Sensor 1.	36
Figura 2.29. Gráfica voltaje vs. tiempo. Sensor 2.	36
Figura 2.30. Proceso de adquisición de datos.	37
Figura 2.31. Tarjeta de adquisición de datos MF 634.	38

Figura 2.32. Pantalla principal del visualizador.	38
Figura 2.33. Pantalla de "Menú principal".....	39
Figura 2.34. Pantalla de conexiones.	39
Figura 2.35. Visualizador de gráficas.	40
Figura 2.36. Pantalla de "Más información".	40
Figura 2.37. Área afectada por la cavitación. Valores en [Pa].	41
Figura 2.38. Proceso de cavitación para el primer caso con obstáculo. Valores en mm.	41
Figura 2.39. Evolución de la cavitación y del área de impacto. Valores de long. en mm.	41
Figura 3.1. Gráficas de Presión vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y los datos de salida de los sensores PVDF.	46
Figura 3.2. Gráficas Presión vs. Tiempo del estudio numérico y los datos de salida de los sensores PVDF para el segundo valor de mayor presión.	47
Figura 3.3. Gráficas de Presión vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y los datos de salida del sensor 1 piezoresistivo.	48
Figura 3.4. Gráficas de Amplitud vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y de los datos de salida del sensor 1 PVDF.	49
Figura 3.5. Gráficas de Amplitud vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y de los datos de salida del sensor 2 PVDF.	50
Figura 3.6. Área de picadura vs. Fuerza de impacto.	53
Figura 3.7. Comparación entre resultados experimentales y resultados de la simulación del sensor.	54

Índice de tablas

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del acero inoxidable X5 Cr Ni 13,4 [5].....	21
Tabla 2.2. Variables y condiciones del medio.	21
Tabla 2.3. Características mínimas de los sensores.	24
Tabla 2.4. Características de sensores analizados.	24
Tabla 2.5. Valores generados por el sensor 1.....	28
Tabla 2.6. Valores generados por el sensor 2.....	29
Tabla 2.7. Características del sensor Mn8-50-EK-25 [26].....	29
Tabla 2.8. Valores generados por el sensor piezoresistivo 1.	30
Tabla 2.9 Valores generados por el sensor piezoresistivo 2.	31
Tabla 2.10. Características de los elementos de acondicionamiento.	33
Tabla 2.11. Características del integrador de carga modelo CI-50-01.....	33
Tabla 2.12 Valores de voltaje generados por el puente en el sensor 1.	36
Tabla 2.13. Valores de voltaje generados por el puente en el sensor 2.	36
Tabla 2.14. Condiciones de operación y evolución de la cavidad.....	42
Tabla 2.15. Costos de referencia para la obtención de datos de impacto al usar un sensor PVDF.	42
Tabla 2.16. Costos de referencia para la obtención de datos de impacto al usar un sensor piezoresistivo.	42
Tabla 2.17. Evaluación del peso específico de cada criterio.	44
Tabla 2.18. Evaluación del peso específico del criterio fiabilidad.	44
Tabla 2.19. Evaluación del peso específico del criterio velocidad de respuesta.	44
Tabla 2.20. Evaluación del peso específico del criterio rango.	44
Tabla 2.21. Evaluación del peso específico del criterio tamaño.	44
Tabla 2.22. Evaluación del peso específico del criterio costo.....	45
Tabla 2.23. Tabla de conclusiones.....	45
Tabla 3.1. Condiciones de operación y evolución de la cavidad.	51
Tabla 3.2. Condiciones de operación experimental.....	52

Glosario de términos.

σ	Número de cavitación.
ρ_l	Densidad del líquido.
U_∞	Velocidad del fluido en la entrada.
P_v	Presión de vapor.
δt	Tiempo de colapso de la burbuja.
R_{max}	Radio máximo de la burbuja.
$P_{m\acute{a}x,min}$	Presión máxima y mínima de trabajo.
P_o	Presión inicial.
A_s	Área de sensor.
P_{ext}	Presión externa o de los alrededores.
$\alpha_{o,f}$	Fracción de volumen, inicial y final respectivamente.
γ	Valor adimensional desde el centro de la burbuja hasta la pared.
C_{agua}	Velocidad del sonido en el agua.
P_{jet}	Presión del jet.
U_{jet}	Velocidad del jet.
\widehat{AoB}	Ángulo de incidencia
σ_{es}	Esfuerzo
$\sigma_{es,max\ 1,2}$	Esfuerzo máximo en la zona 1 y 2 respectivamente.
$\sigma_{es,min\ 1,2}$	Esfuerzo mínimo en la zona 1 y 2 respectivamente.
Q	Carga
A	Área analizada
ρ_m	Densidad del material
E	Módulo de Young
σ_R	Resistencia a la tracción
f	Frecuencia de trabajo.
A_{si}	Área mínima.
f_s	Frecuencia del sensor.

T_o	Temperatura de trabajo.
R_p	Rango de presión.
e_s	Espesor de lámina.
t_{res}	Tiempo de respuesta.
$Q_{m\acute{a}x\ 1,2}$	Carga máxima en la zona 1 y 2 respectivamente.
$Q_{m\acute{i}n\ 1,2}$	Carga mínima en la zona 1 y 2 respectivamente.
R_{cu}	Resistencia de pin de soldadura.
R_o	Resistencia interna.
$R_{m\acute{a}x\ 1,2}$	Resistencia máxima en la zona 1 y 2 respectivamente.
$R_{m\acute{i}n\ 1,2}$	Resistencia mínima en la zona 1 y 2 respectivamente.
C	Capacitancia del transductor.
C_2	Capacitancia del amplificador.
N	Cantidad de sensores.
P	Cambio de presión.
R	Resistencia amplificador.
P_r	Presión en un punto de referencia.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió las formas para medir esfuerzos producidos por la implosión de cavidades que generalmente tiene efectos negativos sobre la turbomaquinaria. El estudio se enfocó en un ala hidrodinámica convexa con un obstáculo semicilíndrico para definir el sensor más adecuado, su tamaño, cantidad y ubicación. El conocimiento de la zona de los daños producidos por cavitación ayudará al mejoramiento de diseños y aumento de la vida útil de las máquinas hidráulicas.

Para los propósitos establecidos se realizó el estudio numérico que permitió determinar la magnitud de las presiones de impacto, partiendo del trabajo “Numerical study on unsteady cavitating Flow and erosion based on homogeneous mixture assumption” y usando el modelo de cavitación propuesto. La simulación de los sensores se realiza mediante el uso de las curvas de calibración la cual entrega valores aproximados del comportamiento real. A continuación, se realizó el acondicionamiento necesario, el cual permite transmitir las señales captadas para poder visualizar la presión en una interface desarrollada para el efecto. Para justificar el uso de los dos sensores analizados, se tomaron como base estudios realizados en experimentos similares, pero con diferentes tipos de ala y diferentes condiciones de parámetros físicos. Para seleccionar el sensor adecuado para medir cavitación se utilizó el método ordinal corregido de criterios ponderados, en la cual se analizan determinadas características de cada solución y se asigna un valor dependiendo el orden de preferencia. Esta da como resultado que la forma aceptable para medir impactos de cavitación es el uso de sensores piezoeléctricos PVDF (Fluoruro de polivinilideno) de tamaño $6,35 \times 6,35$ [mm²], además de colocar un recubrimiento de epoxi que permita proteger al sensor del agua y disminuya las alteraciones producidas por temperatura.

Finalmente, se presenta el cambio del área afectada por cavitación debido a la variación de los parámetros físicos y como influirían sobre el rendimiento de los sensores.

Palabras clave: Cavitación, simulación, PVDF, curva de calibración, acondicionamiento, área afectada.

ABSTRACT

In the present work, it studied the ways to measure stress produced by the implosion of cavities that generally has negative effects on the turbomachinery. The study was focused on a convex hydrodynamic wing with a semi-cylindrical obstacle to define the most suitable sensor, its size, quantity and location. The knowledge of the area of damage produced by cavitation will help to improve designs and increase the useful life of hydraulic machines. For the established purposes, the numerical study was carried out that allowed to determine the magnitude of the impact pressures, starting from the work "Numerical study on unsteady cavitating Flow and erosion based on homogeneous mixture assumption" and using its proposed cavitation model. The simulation of the sensors performs using the calibration curves which gives approximate values of the real behavior. Then, the necessary conditioning was performed, which allows transmitting the captured signals to be able to visualize the pressure in an interface developed for the effect. To justify the use of the two sensors analyzed, studies based on similar experiments were taken as a basis, but with different wing types and different conditions of physical parameters. To select the appropriate sensor to measure cavitation, the corrected ordinal method of weighted criteria was used, in which certain characteristics of each solution are analyzed and a value is assigned depending on the order of preference. This results in that the acceptable way to measure cavitation impacts is the use of piezoelectric sensors PVDF (polyvinylidene fluoride) of size 6.35×6.35 [mm²], in addition to placing an epoxy coating that allows to protect the sensor of water and decrease the alterations produced by temperature.

Finally, the change of the area affected by cavitation is presented due to the variation of the physical parameters and how they would influence the performance of the sensors.

Keywords: Cavitation, simulation, PVDF, calibration curve, conditioning, affected area.

“ESTUDIO NUMÉRICO Y SIMULACIÓN PARA LA TOMA DE DATOS DE IMPACTO DEBIDO AL COLAPSO DE CAVIDADES SOBRE SUPERFICIES BAJO CONDICIONES DE FLUJO CAVITATIVO”

INTRODUCCIÓN

Según datos del Balance Nacional de Energía Eléctrica de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, la mayor cantidad de energía eléctrica producida en el país proviene de centrales hidroeléctricas, llegando a representar el 66,89% de producción total de energía para el 2017 [2], en estas centrales se usan turbinas Francis, Pelton y Kaplan; por lo que es de vital importancia el estudio de la cavitación debido a que ocasionan problemas de ruido, vibración, daños en la superficie del material (erosión), y pérdida de eficiencia en máquinas hidráulicas como en los elementos constituyentes [3], [4]. Al analizar los problemas económicos dados por la erosión, se tiene que se generan elevados costos tanto en la reparación como en las pérdidas de ingresos debido al tiempo empleado para su reparación [4].

Como es necesario disminuir los efectos negativos causados por la cavitación se han desarrollado modelos de dinámica de fluidos computacionales (CFD), los cuales permiten predecir de mejor manera el flujo cavitativo y ayudan al mejoramiento de diseños de maquinaria hidráulica tanto en potencia específica como en ahorro de dinero.

Partiendo de los resultados obtenidos mediante simulación y usando el modelo de erosión propuesto por Hidalgo [1], se realiza el análisis para la medición de impactos debido a la implosión de cavidades sobre un ala hidrodinámica convexa con obstáculo. El estudio tiene la finalidad de determinar ubicación, características y número de sensores; además de vaticinar como sería el aumento del área de daño cambiando la velocidad del fluido y ángulo de impacto sobre este tipo de ala.

Finalmente se determina como influiría el cambio de área afectada por cavitación sobre el rendimiento de los sensores seleccionados. Todo este estudio ayudará a disminuir los costos que representaría la instalación de los mismos sin un previo análisis [4], [5].

Objetivo general

Estudiar y simular un dispositivo para la toma de datos de impacto de cavidades sobre superficies bajo condiciones de flujos cavitantes.

Objetivos específicos

- Identificar los principales parámetros físicos medibles, que intervienen en el proceso de cavitación en un ala dentro de un fluido acuoso requeridos para la selección del dispositivo;
- Deducir las fuerzas que van a actuar sobre el sistema generadas por el propio fluido al pasar sobre la superficie;
- Comparar los distintos mecanismos de toma de datos de impacto en la superficie bajo efectos cavitantes y selección del más adecuado para la simulación en el sistema;
- Determinar la ubicación adecuada de los transductores a utilizar, considerando las limitaciones electrónicas y constructivas del sensor;
- Visualización del sistema de medición, integrando la toma de datos teóricos con diferentes ángulos de impacto, mediante el control de la rotación de un ala dentro de un fluido acuoso;
- Visualizar en una pantalla los valores obtenidos por el sensor que puedan ser utilizados por registradores o como disparadores de niveles de alarma;
- Análisis de mecánica de fluidos para la optimización del dispositivo simulado.

Alcance

El proyecto de investigación se centra en definir el tipo de sensor, su ubicación, el número de ellos y tamaño para permitir medir las presiones provocadas por la implosión de cavidades sobre un ala hidrodinámica convexa con un obstáculo semicilíndrico bajo flujos cavitativos y con los parámetros iniciales usados por Hidalgo [1] en su disertación doctoral. Esto incluye:

- Extraer datos de simulación.
- Determinar la ecuación de las presiones producidas por la cavitación y la región afectada por la misma.
- Simular y validar el sensor utilizado para medir las presiones de impacto.
- Acondicionar el sensor y visualizar las gráficas obtenidas
- Determinar la región afectada por la cavitación al variar los parámetros físicos iniciales.

1. MARCO TEÓRICO

El concepto de cavitación fue introducido por primera vez por Leonhard Euler. La complejidad del tema requiere una secuencia de ideas que se presentan y se revisan. Primero se aborda una serie de conceptos que deben ser conocidos para entender el fenómeno. A continuación, se describe los tipos de cavitación que se generan en un ala hidrodinámica al variar el número de cavitación, el ángulo de ataque y manteniendo otras propiedades constantes. Además, se estudia los principales efectos que genera la cavitación, el cual ayuda a definir las fórmulas de impacto sobre una superficie. En las últimas partes se revisa las investigaciones realizadas en cuanto a la medición de impactos de cavitación, para finalmente revisar los sensores que se utilizaron en el presente proyecto.

1.1. Conceptos básicos

1.1.1. Cavitación

La cavitación es la formación de burbujas de gas (cavidades) debida a la disminución de presión y el posterior colapso de estas en el seno de un líquido. El fenómeno es similar al de la ebullición, pero la diferencia radica en que en la ebullición existe un aumento en la temperatura a presión constante, mientras que en la cavitación existe una reducción de presión a una temperatura T_f constante, como se puede ver en la Figura 1.1 [6] [7].

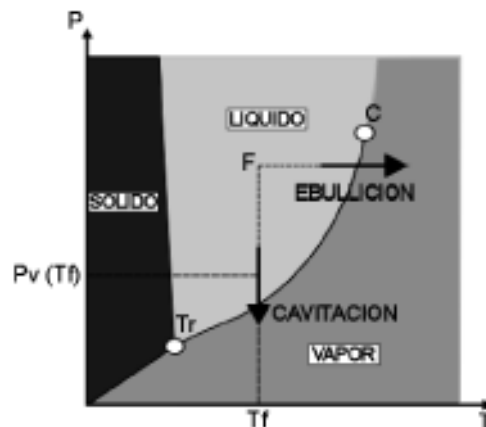


Figura 1.1. Diferencia entre proceso de cavitación y ebullición.
(Fuente: [6])

1.1.2. Número de cavitación

El número de cavitación es importante para determinar el tipo de flujo cavitativo y la relación de crecimiento de cavidades [8]. Para determinar el tipo de cavitación, este

término viene asociado con otros términos que son el número de Reynolds y ángulo de ataque, los cuales al variar me predicen el tipo de cavitación que se generará. Por ejemplo, en un ala hidrodinámica NACA 16012 a 8 grados de ángulo de ataque y número de Reynolds de 10^6 , se tiene que existe supercavitación si el número de cavitación se encuentra en un rango de 0.045-0.21. El número de cavitación se define mediante:

$$\sigma = \frac{P_r - P_v}{\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2}$$

Ecuación 1.1. Número de cavitación.
(Fuente: [8])

Donde:

- P_r Presión en un punto de referencia.
- P_v Presión de vapor a la temperatura de trabajo.
- U_∞ Velocidad del flujo.
- ρ_l Densidad del fluido.

1.1.3. Núcleos de cavitación

Los núcleos de cavitación son puntos iniciadores del proceso de cavitación, son consideradas como microburbujas y se desarrollan previo a la presión de vapor. Su tamaño está entre unos pocos micrómetros y algunos cientos de micrómetros. Los núcleos crecen por dos razones principales [6]:

- Los núcleos libres (no unidos a la pared) aumentan debido a la gravedad.
- Por el intercambio de gas por difusión que realizan los núcleos con el gas disuelto en el líquido.

Debido a que el coeficiente de difusión del gas es lento (en el orden de un segundo), el tiempo de difusión es grande en comparación al tiempo necesario para el colapso de la burbuja (milisegundos).

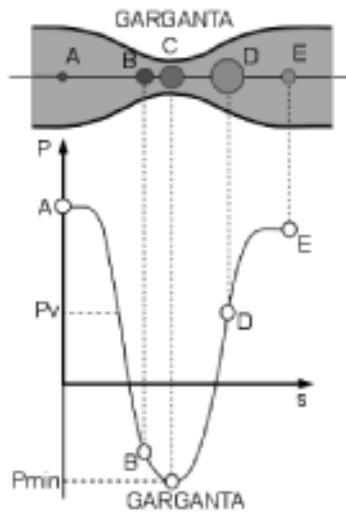


Figura 1.2. Proceso de evolución de los núcleos.
(Fuente: [6])

La evolución de las microburbujas se produce de la forma en que se muestra en la Figura 1.2. El núcleo empieza con una presión inicial mayor a la presión de saturación (P_v), en el punto A, luego viaja a una zona B, en donde su presión es mucho menor que P_v y además va aumentando su tamaño, hasta que llega a un punto C (garganta) en el cual adquiere su menor presión (P_{min}). El mayor tamaño de la burbuja es alcanzado en el punto D, en el cual además está en condiciones inestables, provocando la implosión violenta [9], [6].

1.1.4. Colapso de la burbuja

En el presente estudio se considera a las burbujas como esféricas debido a la simplicidad del modelo y porque esta forma se relaciona con los máximos efectos durante el colapso como son: temperatura, ruido y presión [1]. Para el tiempo de colapso característico viene dado por la siguiente ecuación [6]:

$$\delta t = 0,917 \frac{R_{max}}{\sqrt{\frac{P_{ext} - P_{min}}{\rho_1}}}$$

Ecuación 1.2. Tiempo de colapso de una burbuja.
(Fuente: [6])

Donde:

- R_{max} Radio máximo de la burbuja en la región de presión mínima.
- P_{ext} Presión exterior,
- P_{min} Presión mínima,
- ρ_1 Densidad del fluido.

1.1.5. Parámetros que producen cavitación

Los principales parámetros determinados por Franc y Michel [6], que ocasionan cavitación son:

- La aspereza y la geometría de la pared, las cuales pueden generar un aumento brusco en la velocidad y una reducción en la presión, esto ocurre si se tiene restricción en el área de la sección transversal del conducto o por la curvatura impuesta en la línea de flujo.
- Las altas fluctuaciones de presión turbulenta producen cavitación en forma de hilos. Es común ver este tipo de cavitación en el extremo de las palas de una hélice de barco.
- La naturaleza inestable de ciertos flujos, como el golpe de ariete, produce caídas instantáneas de presión en ciertos puntos dando origen a la cavitación.
- Los movimientos oscilatorios y por ultrasonido; las cuales generan presiones fluctuantes. Si estas presiones tienen una amplitud grande, la cavitación puede aparecer, si se producen oscilaciones negativas.

Para predecir el inicio de la cavitación, es necesario conocer la presión y compararla con un valor que habitualmente es la presión de vapor debido al cambio de fase líquido-vapor. Para el cálculo de la presión tanto en flujos unidimensionales como en estacionarios, se utiliza la ecuación de Bernoulli. Mientras que, en flujos turbulentos, el uso de la dinámica computacional ha hecho posible predecir la generación de cavidades [6].

1.2. Tipos de cavitación

Franc y Michel en el libro “Fundamentals of cavitation” [6], clasifican los tipos de cavitación considerando un flujo bidimensional sobre un ala hidrodinámica NACA 16012 y variando el ángulo de ataque, número de cavitación y considerando un número de Reynolds fijo [6].

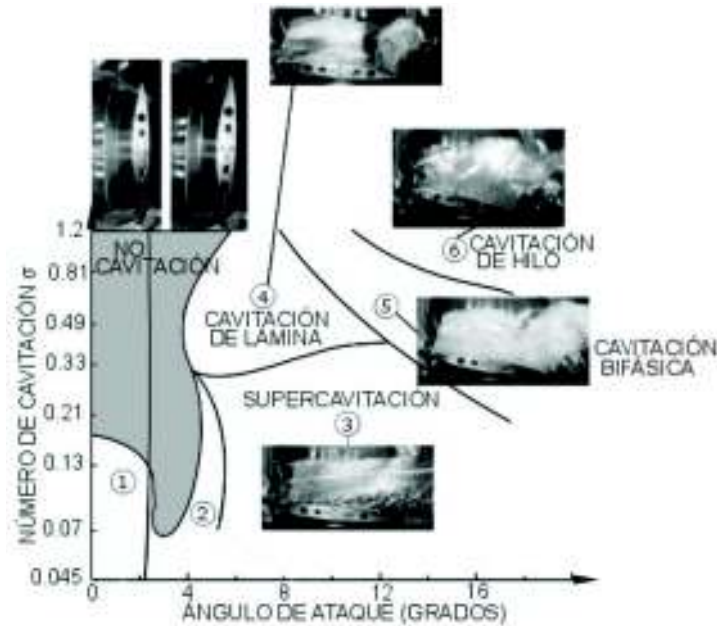


Figura 1.3. Clasificación de los tipos de cavitación.
(Fuente: [6])

De la Figura 1.3, se tiene que el área gris es la zona donde no ocurre cavitación. En la zona 1, 2 y 3, se tiene que, para valores pequeños de número de cavitación, existe supercavitación para cualquier ángulo de ataque. Para la zona 4 se tiene un estado intermedio, en el que se tiene cavitación parcial. La zona 5, es la cavitación bifásica, en la cual coexiste la cavitación de hilo con la cavitación parcial y la supercavitación con la cavitación de hilo. La zona 6 es la de cavitación de hilo, en la cual se tiene altos valores tanto de ángulo como de número de cavitación. Además, se considera el estudio de cavitación de vórtice [6], [9].

1.2.1. Supercavitación

El fenómeno de la supercavitación es usado para disminuir la resistencia hidrodinámica, debido a que, al mover un objeto a gran velocidad a través de un líquido, ocasiona que el fluido a su alrededor pierda presión y en un inicio se crea la cavitación, para luego extenderse, originando que el objeto ya no se desplace a través de un líquido sino más bien a través de un gas. De esta manera se puede aumentar la velocidad de un objeto de forma significativa [9], [10]. El principal inconveniente es que el proceso de supercavitación no es fácil de controlar, por lo tanto, un objeto que quiera reproducir este fenómeno debe alcanzar velocidades mayores a 45 [m/s] para producir y mantener la burbuja de cavitación. Además, una vez que se llega a la velocidad indicada, el direccionamiento del objeto es de gran dificultad para controlar [11].

Existen diferentes formas de lograr la supercavitación:

- Acelerando la velocidad del flujo de entrada. (más alto que 45 m/s a nivel del mar).
- Reduciendo la presión exterior. Esto es factible de forma experimental, mediante túneles de agua.
- Aumentando la presión de cavitación, mediante la inyección de gas no condensable.

Las dos primeras formas de generar cavitación se conocen como supercavitación natural. Y la tercera forma se conoce como supercavitación artificial [12].

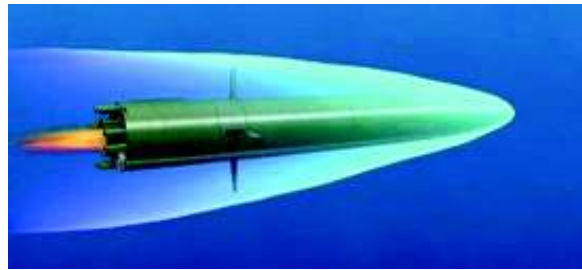


Figura 1.4. Proceso de supercavitación en un torpedo.
(Fuente: [13])

1.2.2. Cavitación de lámina (Partial cavitation)

Se conoce como cavitación inestable de lámina, al tipo de cavitación que se cierra sobre la superficie de una lámina, como se muestra en la Figura 1.5. (a). Usualmente se genera desde el borde de ataque en el lado de la succión de un ala hidrodinámica con un ángulo de incidencia positivo. Uno de los parámetros más importantes para este tipo de cavitación es el ángulo de ataque ya que dependiendo de este parámetro, se presenta de diferentes formas la cavidad, teniendo una presión de flujo libre dada [6].

Se producen generalmente en dos situaciones prácticas, la primera es sobre hélices y en bombas. En el caso de un ala hidrodinámica, como se observa en la Figura 1.5, a medida que disminuye el número de cavitación, la cavidad se va extendiendo sobre la superficie y en ocasiones se extiende a su tamaño original, convirtiéndose la cavitación parcial en supercavitación [6], [14].

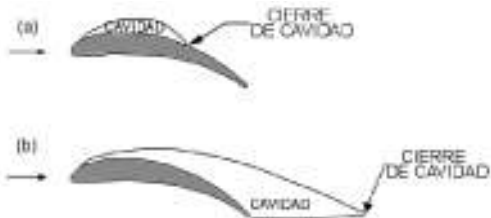


Figura 1.5. (a) Cavitación parcial, (b) Supercavitación.
(Fuente: [14])

El límite o cierre de la cavitación parcial se produce debido a que la presión dentro de la cavidad es menor, por lo que la curvatura de las líneas de corriente tienden a dirigirse hacia la cavidad, haciendo que el flujo se divida en dos partes: el chorro reentrante que va llevando una pequeña cantidad de líquido al interior de la cavidad y un caudal exterior que vuelve a fijarse a la pared. Estas dos partes pueden observarse en la Figura 1.6 y se da en cavidades delgadas, donde el contraflujo del líquido es pequeño. Si se tiene una cavidad gruesa, el chorro reentrante puede incluso tener mucho más impulso para alcanzar la parte frontal de la cavidad, ocasionando la separación de la cavidad para después arrastrar a las cavidades aguas abajo [6].

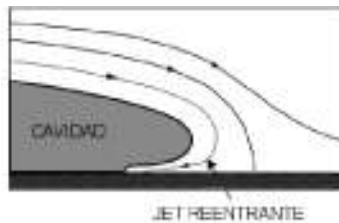


Figura 1.6. Región de cierre de una cavitación parcial.
(Fuente: [6])

Una de las etapas de la cavitación inestable de lámina es la nube de cavitación. Se producen por la separación de la cavidad de la superficie del ala, debido a las oscilaciones del volumen de la cavidad, cuando la longitud de la cavidad excede un valor específico de la geometría [12]. Esta etapa de cavitación afecta fuertemente en el funcionamiento hidrodinámico y produce vibración, ruido y erosión.

1.2.3. Cavitación de hilo

Bair y Winer fueron los primeros en proponer que la cavitación puede ocurrir en flujos de corte cuando el esfuerzo de corte excede la presión [15]. Este tipo de cavitación está presente en estelas y chorros sumergidos con altos números de Reynolds, además en regiones separadas las cuales se desarrollan en alas con ángulos de ataque elevados. El inicio y desarrollo de la cavitación en flujos de corte es controlado por su estructura no cavitante. Tales flujos están limitados por regiones de alto corte donde la vorticidad es producida. Como resultado, se forman estructuras rotacionales

y el nivel de presión cae en los núcleos de los vórtices, los cuales se convierten en potenciales sitios de cavitación [6], [9], [16].

Para el estudio del desarrollo de la cavitación, se considera obstáculos con bordes afilados como las cuñas, debido a que el punto de separación de la capa límite es fijo. Cuando la cavitación ocurre, las estelas aparecen y tienen tres diferentes formas y tienen tres diferentes formas de acuerdo con la distancia desde la cuña como se observa en la Figura 1.7 [6].

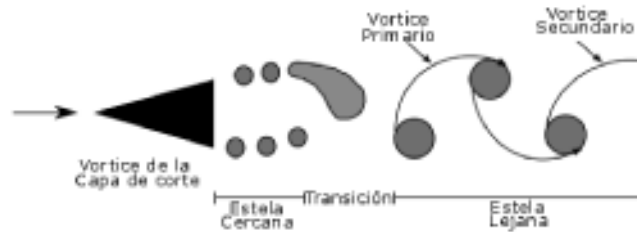


Figura 1.7. Transformación de la estela durante la cavitación (Fuente: [6]).

En la estela cercana, los vórtices de pequeña escala se vierten periódicamente en las dos capas de corte que se originan en los bordes de salida de cuña.

La estela lejana está compuesta por los clásicos vórtices clásicos 2D Bénard-Kármán. Estos están conectados entre sí por filamentos de vórtice 3D en sentido de la corriente que describe en condiciones no cavitantes [6]. También se tiene una región de transición que en la mayoría de los casos está compuesta por una mezcla de dos fases, además en esta región los vórtices de pequeña escala dan lugar a vórtices de gran escala [6].

1.2.4. Cavitación de vórtice

Brennen en el libro “Cavitation and bubble dynamics” [14] describe la cavitación de vórtice, la misma que puede ser observado en propulsores marinos, siendo por tanto la fuente primaria de avería y disminución de rendimiento del buque. Se produce cuando estructuras rotacionales generan regiones de baja presión dentro del líquido, estas regiones son llenadas con vapor, dando lugar a la cavidad. El movimiento rotacional puede ser generado por la propia turbulencia o mediante cuerpos sólidos. Este tipo de cavitación se produce con valores altos de número de cavitación, en comparación a otros tipos de cavitación [6], [14].



Figura 1.8. Cavitación de vórtice en el tubo de aspiración de una turbina Francis.
(Fuente: [14])

1.3. Efectos de la cavitación

Entre los principales efectos de la cavitación están: producción de ruido, aparición de fuerzas adicionales, erosión de la pared, entre otros efectos.

Generalmente es permitido un cierto grado del desarrollo de la cavitación debido al costo que generaría el eliminar el fenómeno totalmente. La producción de la cavitación también puede ser beneficiosa como por ejemplo la utilización de la supercavitación para eliminar la fricción en el movimiento de un objeto a alta velocidad por un líquido, deposición electrolítica, producción de emulsiones, limpieza de superficies, destrucción de bacterias, entre otros [6].

1.3.1. Ruido producido por cavitación

El ruido precipitante es la evidencia más característica del fenómeno y es el resultado de las ondas de choque generadas por el colapso de las burbujas. A partir de la medición de ruido, es posible encontrar los impulsos que son a alta presión y determinar el tiempo en el cual se dio la implosión. En la Figura 1.9 se puede observar las señales producidas, los cuales corresponden al primero (tiempo cercano a 400 [μ seg]) y segundo (t cercano a 1100 [μ seg]) colapso respectivamente.

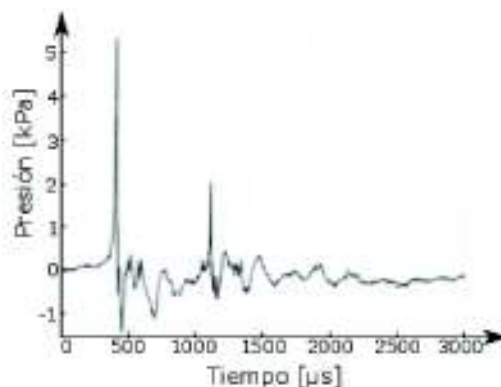


Figura 1.9. Señales acústicas producidas por la cavitación.
(Fuente: [14])

1.3.2. Aparición de fuerzas adicionales

La aparición de fuerzas adicionales también se conoce como levante y arrastre. A una velocidad de flujo constante, la elevación y arrastre de un ala hidrodinámica no varía a medida que se baja la presión, hasta que la cavitación comienza. Como se puede observar en la Figura 1.10, a medida que la cavitación se desarrolla, la elevación disminuye y el arrastre aumenta. Al tener estos cambios de levante y arrastre, hace que el flujo se vuelva bastante inestable y en ocasiones produce vibraciones severas sobre la máquina hidráulica.

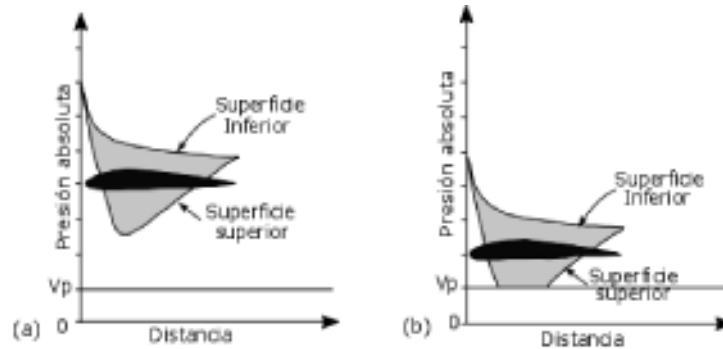


Figura 1.10. Efectos de elevación y arrastre. a) Previo a la cavitación. b) Cavitación desarrollada.
(Fuente: [17])

1.3.3. Erosión por cavitación

De acuerdo con Peters et al. [18], el principal mecanismo de erosión es mediante las ondas de presión de alta amplitud, las cuales son generadas por la implosión de una nube de cavitación. Estas ondas viajan a través del fluido y son capaces de dañar directamente la superficie de un material. Para cuantificar los daños, Peters [18] se basó en la hipótesis de Dular y Countier-Delgosha, la que menciona que el daño en una superficie es debido al colapso de burbujas individuales que después del colapso forman microjets. La velocidad del microjet es una de las cantidades críticas para la predicción de la erosión por cavitación. Hidalgo [1] determinó la velocidad de impacto del microjet U_{jet} mediante:

$$U_{jet} = 8,97\gamma^2 \sqrt{\left(\frac{P - P_v}{\rho_l}\right) \left(\frac{\alpha_o - \alpha_f}{\alpha_o}\right)}$$

Ecuación 1.3. Velocidad de impacto del Jet.
(Fuente: [1])

Donde:

$\gamma = 1,1$

Valor adimensional desde el centro de la burbuja hasta la pared.

$P_v = 2329,57[\text{Pa}]$

Presión de vapor a $T=20^\circ\text{C}$, calculada con la ecuación de Antoine. [19]

$\rho_l = 998,29 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	Densidad del fluido (agua a $T=20^\circ\text{C}$).
$\alpha_{o,f}$	Fracción de volumen, inicial y final respectivamente.
P	Cambio de presión.

La distancia para que un microjet pueda generar un alto potencial dañino [18] es la distancia de separación de $\gamma = \frac{H}{R_b} = 1,1$, donde H, es la distancia desde el centro de la burbuja a la superficie y R_b es el radio de la burbuja.

Como el impacto del microjet es considerado el principal mecanismo de daño de una superficie sólida [1], [18], [20], se tiene la presión de impacto del jet:

$$P_{\text{jet}} = U_{\text{jet}} \cdot C_{\text{agua}} \cdot \rho_l$$

Ecuación 1.4. Presión de impacto del jet.
(Fuente: [1])

Donde:

$C_{\text{agua}} = 1483 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ Velocidad del sonido en el agua a $T=20^\circ\text{C}$, calculada con la ecuación de Randall [21].

1.4. Investigaciones realizadas

Se han realizado varios estudios para la medición de impactos debido al colapso de las burbujas, entre los más representativos están los realizados por:

- Momma y Lichtarowicz en el artículo “A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation” publicado en 1995 [22], presentó los resultados que se obtienen al montar un sensor de presión piezoeléctrico PVDF (fluoruro de polivinilideno) en forma de película sobre un espécimen de aluminio para medir y contar impulsos de presión de cavitación generados en un aparato de chorro cavitante. Además, erosionaron especímenes de aluminio para determinar las pérdidas de masa y producir pozos que se contaron y midieron. La erosión producida se correlacionó con el conteo de pozos y con los datos de pulso de presión [22].
- Soyoma et al.[23], en el artículo “A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement” publicado en 1998, realizó investigaciones de la carga dinámica generada por el colapso de cavidades sobre una superficie, para lo cual utilizó un sensor piezoeléctrico PVDF.

Además, desarrolló un nuevo método de calibración dinámica para un sensor PVDF.

- Gustavson et al. [24], en el artículo “PVDF pressure transducers for shock wave and explosives research” mostró los estudios de la respuesta del transductor de PVDF montado en superficie y sometido a choques submarinos. Además, describió brevemente el uso de sensor piezoresistivo de manganina.
- Hujer et. al. [25], en el artículo “Impact load measurements with a PVDF pressure sensor in an erosive cavitating flow” publicado en 2015, describió la utilización de un sensor PVDF para medir los picos de presión ocasionados por el colapso de las burbujas de cavitación. Los datos registrados fueron procesados para obtener el espectro de carga de impacto para diferentes velocidades a números de cavitación constante.

1.5. Sensores para medición de esfuerzos

La presión generada por la implosión de la burbuja y el impacto del jet de agua ocasiona que en el material se forme un esfuerzo de igual magnitud ($P_{jet} = \sigma_{es}$). Para la medición del fenómeno se utilizan sensores de esfuerzo, que son dispositivos en los cuales, al tener una señal física de entrada, devuelven una señal de salida diferente. Existen varios tipos de sensores para medir impacto, pero se analizará dos tipos, los sensores piezoeléctricos y los sensores piezoresistivos, que son los que mejor se adaptan al proceso que se requiere medir como se muestra en la Figura 1.11 [26].

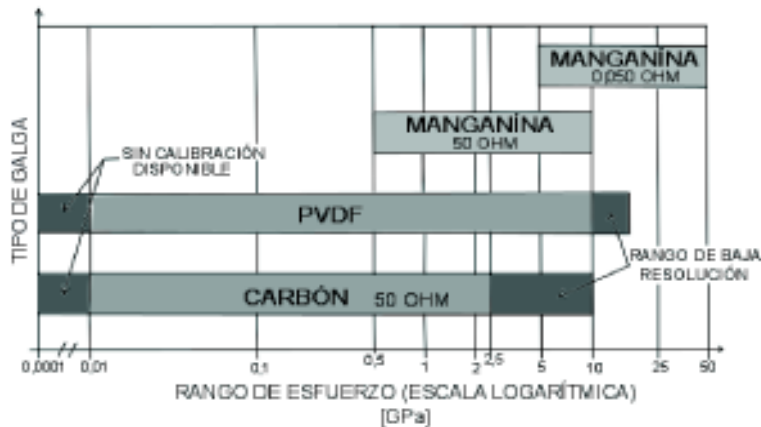


Figura 1.11. Cuadro de selección del sensor.
(Fuente: [26])

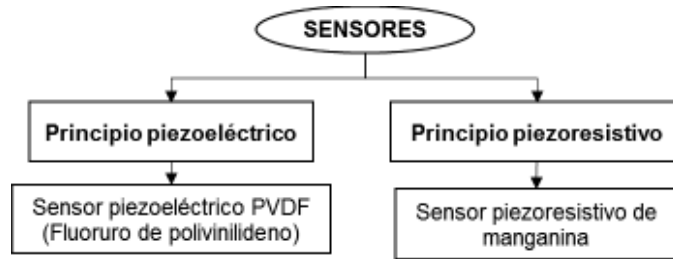


Figura 1.12. Clasificación de los sensores estudiados.
(Fuente: Propia)

1.5.1. Sensores Piezoeléctricos

Son elementos activos que emplean el efecto piezoeléctrico descubierto por los científicos Franceses Jacques y Pierre Curie en 1880; y consiste en la generación de cargas eléctricas por la polarización eléctrica de la masa de ciertos cristales como el cuarzo al ser sometido a un esfuerzo de deformación. La carga eléctrica generada es proporcional en amplitud y frecuencia de la fuerza aplicada [27].

Los campos eléctricos y de polarización generados por los elementos piezoeléctricos comúnmente se describen mediante vectores, a diferencia del esfuerzo y la deformación, los cuales son descritos mediante tensores. Por lo antes mencionado, las constantes piezoeléctricas cambian respecto a la dirección de deformación respecto a cada eje, con lo que se tiene que las relaciones estáticas entre las variables mecánicas y eléctricas pueden ser descritas mediante:

$$D = dT + e^T E$$

Ecuación 1.5. Ecuación piezoeléctrica directa.
(Fuente: [28])

En la ecuación 1.5, bajo un esfuerzo aplicado, se genera un desplazamiento eléctrico.

$$S = s^E T + dE$$

Ecuación 1.6. Ecuación piezoeléctrica inversa.
(Fuente: [28])

La ecuación 1.6, representa que, al aplicarse un campo eléctrico, se produce una deformación del material. D es la densidad de flujo eléctrico por unidad de área en forma vectorial. d es la constante piezoeléctrica que relaciona la parte eléctrica con la mecánica; E la permitividad, e^T representa el desplazamiento eléctrico cuando las tensiones permanecen constantes; s^E es la constante que representa la interacción de una deformación y una tensión con la condición de campo constante, S deformación y T es el esfuerzo, estas dos últimas como magnitudes tensoras. Las constantes tienen la naturaleza de derivadas parciales.

Sensor piezoeléctrico PVDF (Fluoruro de polivinilideno)

Es un tipo de sensor piezoeléctrico, el cual está compuesto en su gran mayoría por fluoruro de polivinilideno. Generalmente cuando se adquiere este tipo de sensor, viene con la curva de calibración cuasi estática, que tiene un 98% de precisión y entrega los valores en unidades de carga por unidad de área, por lo que en la salida se requiere contar con un acondicionador de señal o convertidor de carga. De acuerdo con estudios realizados por la fuerza naval estadounidense [29], se comprobó que en agua se pueden obtener resultados de esfuerzos máximos mediante el uso de sensores PVDF [30]. Las principales características de los sensores PVDF son su baja densidad y buena sensibilidad, además de ser resistente mecánicamente.



Figura 1.13. Ilustración de una galga PVDF.
(Fuente: [26])

1.5.2. Sensores piezoresistivos

Son elementos pasivos, los cuales transforman una deformación elástica en un cambio de resistencia proporcional a la deformación.

Para convertir la resistencia en voltaje absoluto se utiliza el puente de Wheatstone, siempre y cuando la deformación cumpla la ley de Hooke. El factor que relaciona la deformación con el voltaje absoluto es el factor de galga.



Figura 1.14. Sensor piezoresistivo.
(Fuente: [31]).

Sensor piezoresistivo de manganina

El sensor está compuesto por una aleación de 82-86% de cobre, 12-15% de manganeso y 2-4% de níquel. Entre sus ventajas está en que presenta una alta sensibilidad a presiones hidrostáticas, generando una resistencia lineal para presiones extremadamente altas.



Figura 1.15. Sensor piezoeléctrico de manganina.
(Fuente: [26])

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describirá el estudio numérico para la toma de datos de impacto, la manera de medir las presiones de impacto y el ambiente de simulación desarrollado. El estudio numérico se realizó en paraview y la simulación se la hizo utilizando Matlab. El diagrama de bloques de la medición es el mostrado en la Figura 2.1.

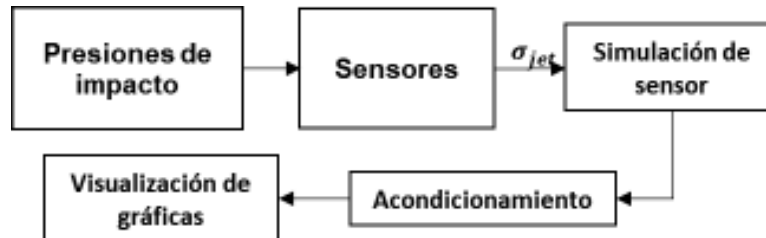


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la medición de presiones de impacto.
(Fuente: Propia)

2.1. Presiones en el sistema

2.1.1. Antecedentes

Se parte de los resultados del trabajo doctoral “Numerical study on unsteady cavitating Flow and erosion on homogeneous mixture assumption” [1], en la que presentó un nuevo modelo de erosión por cavitación basado en la energía liberada durante el colapso. Mediante este modelo, se puede evaluar la agresividad del flujo, la región total afectada y el material deformado, además se basa en la hipótesis de flujo homogéneo de la mezcla y en la transformación de la energía potencial y cinética entre el inicio y el final del colapso. Para la validación del modelo de erosión por cavitación, Hidalgo [1] comparó el resultado de la simulación con los trabajos experimentales llevados a cabo en la Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) por Escaler et al. [5], en su trabajo “Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using Surface-mounted obstacles” en la cual colocó un ala hidrodinámica convexa con obstáculo semicircular en un túnel generador de cavitación y lo sometió a las mismas condiciones iniciales de ángulo de ataque (α), velocidad de número de cavitación (σ). Se debe recalcar que el obstáculo es usado para generar una alteración en el flujo con el fin de incrementar la agresividad mediante la generación de vórtices de cavitación. Los resultados de validación [1], mostraron regiones similares afectadas por el flujo agresivo y además mejores que las obtenidas por Peters et al. [18] y Li [32].

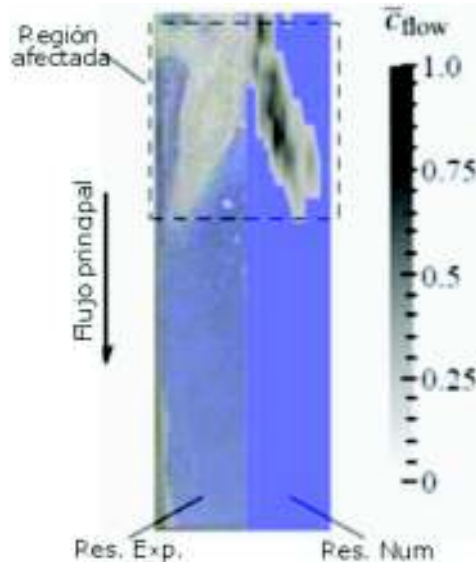


Figura 2.2. Validación del modelo de erosión propuesta por Hidalgo.
(Fuente: [1])

Del estudio realizado en [1], se tomaron los parámetros α_0 (fracción de volumen inicial), α_f (fracción de volumen final) y P (cambio de presión).

Utilizando las ecuaciones de velocidad de impacto del jet (Ecuación 1.3) y de presión de impacto del jet (Ecuación 1.4), se determina estos parámetros. Como lo describe la Figura 2.3.

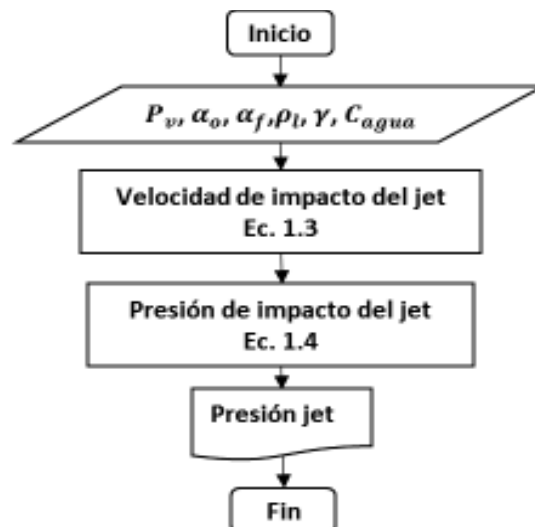


Figura 2.3. Diagrama del proceso de obtención de la presión del jet.
(Fuente: Propia)

Para usar los datos de fracción de volumen inicial, volumen final y de cambio de presión; se utiliza el software Paraview. Además de visualización, en paraview se puede aplicar las fórmulas de velocidad y presión de impacto del jet para la obtención de la zona más afectada mediante la suma de las presiones de impacto.

2.1.2. Descripción de Paraview

Paraview es una aplicación de código abierto que permite la visualización y análisis científico de conjuntos de datos de gran tamaño tanto en 2D como en 3D; puede procesar un conjunto muy grande de datos en paralelo y después permite su recopilación. Está construida sobre la herramienta de visualización VTK (Visualization Toolkit), por lo que puede ser extendida, configurada y renderizada. Proporciona muchos algoritmos de visualización de propósito general, así como algunos algoritmos específicos de las disciplinas científicas en particular y además permite la aplicación de algoritmos de visualización personalizada. Para la visualización lo que realiza el programa es tomar un conjunto de datos sin procesar y convertirlos en una forma que sea visible y comprensible para los seres humanos. Diseñado para que todas sus componentes puedan ser reutilizados para desarrollar rápidamente aplicaciones vectoriales, ayudando a que tenga funcionalidad específica para un problema en específico. Para poder visualizar se tiene 3 pasos básicos [33], [34]:

- Leer; los datos pueden provenir de las mallas de simulación o de datos de escáner para la visualización científica.
- Filtrar; se puede aplicar lectores que procesen los datos para generar, extraer o derivar características de los datos.
- Representación; generalmente se muestran en tridimensional, por lo que los datos primarios usados en la aplicación son de mallas.

2.1.3. Funciones de Paraview usadas

Las funciones en Paraview también conocidas como filtros, son unidades que permiten procesar los datos para generar, extraer o derivar características de los datos. Los filtros se juntan a fuentes, lectores u otro tipo de filtros para modificar sus datos. Los que se usaron para la extracción y posterior procesamiento de los datos están [33], [34]:

Calculadora: Genera una nueva matriz de datos o una nueva coordenada de puntos como función de matrices de entrada existente. Funciona al igual que una calculadora científica evaluando una expresión por puntos o por celdas. Se la usa para ingresar la Ecuación 1.3 y Ecuación 1.4 que corresponden a la velocidad y presión de impacto del jet.

Clip: Permite eliminar la geometría de un lado del plano definido por el usuario, mediante la intersección con un medio espacio. Por lo que facilita la extracción de datos del sistema analizado mediante la eliminación de una parte de la geometría, además de permitir una mejor visualización.

Find data: Permite seleccionar y extraer datos en una determinada región de la simulación para analizarla.

Plot Selection Over Time: Permite el trazado de atributos en el tiempo de los elementos seleccionados. Mediante esta función es posible construir la Figura 2.6.

Temporal Statistic: Permite obtener el valor máximo, valor mínimo y promedio de la simulación total.

2.1.4. Descripción del ala y condiciones iniciales

Para el presente proyecto se utiliza un ala convexa con obstáculo semicilíndrico. El ala hidrodinámica convexa tiene una longitud de cuerda de 91,1[mm], su ancho es de 27,33[mm], presenta un borde delantero semicircular y un borde de salida puntiagudo como se muestra en Figura 2.4 [1].

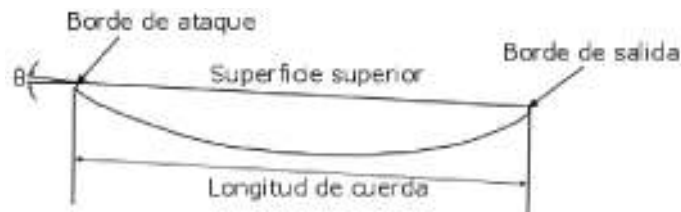


Figura 2.4. Ala convexa sola.
(Fuente: [1]).

Sobre el ala convexa se monta un obstáculo semicircular, que tiene como finalidad inducir severa erosión localizada sobre la superficie del ala, produciendo una importante pérdida de masa de material en un periodo relativamente corto. La erosión es generada por los fuertes vórtices de cavitación. Además, el método de vórtice de cavitación permite clasificar a los materiales de acuerdo con su resistencia a la erosión [5].

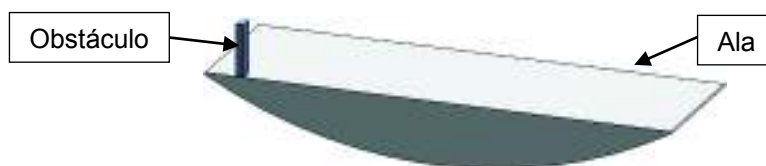


Figura 2.5. Ala convexa con obstáculo.
(Fuente: [1]).

El material del ala convexa es de acero inoxidable de la serie X5 Cr Ni 13.4 y tiene las propiedades mecánicas mostrada en la Tabla 2.1 [5].

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del acero inoxidable X5 Cr Ni 13,4 [5].

Acero inoxidable X5 Cr Ni 13,4			
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad	ρ_m	13900	kg/m ³
Módulo de Young	E	220	MPa
Resistencia a la tracción	σ_r	780	N/mm ²
Dureza		220	HV

(Fuente: [5])

Las condiciones iniciales de velocidad de flujo de entrada (U_∞), número de cavitación (σ), ángulo de incidencia ($\widehat{A\circ B}$) son necesarias controlar para asegurar las condiciones de flujo constante debido a que sus valores influyen en el cálculo de la presión de impacto del jet [35].

Los parámetros antes mencionados y otros parámetros que ayudarán a determinar las especificaciones de construcción y de operación que debe tener el dispositivo de medición se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variables y condiciones del medio.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Velocidad de Flujo	U_∞	35	m/s
Número de cavitación	σ	1	
Ángulo de ataque	$\widehat{A\circ B}$	3	Grados
Presión inicial	P_o	613,6	KPa
Presión máxima del jet	P_{max}	0,376449	GPa
Frecuencia de impacto	f	1×10^4	kHz
Temperatura de trabajo	T_o	20	°C
Área analizada	A	1245	mm ²

(Fuente: Propia)

2.1.5. Zonas de presión máxima

Mediante la aplicación de las funciones de Paraview descritas en el punto anterior, se obtiene la gráfica de presión vs. tiempo de los impactos producidos por las implosiones sobre toda la superficie del ala hidrodinámica, como se muestra en la Figura 2.6. Mediante esta gráfica se puede identificar el tiempo de simulación, zona y valor de la presión de la implosión en la que se producen los mayores valores de impacto. Dando que la zona donde se debe colocar los sensores son los mostrados en la Figura 2.8.

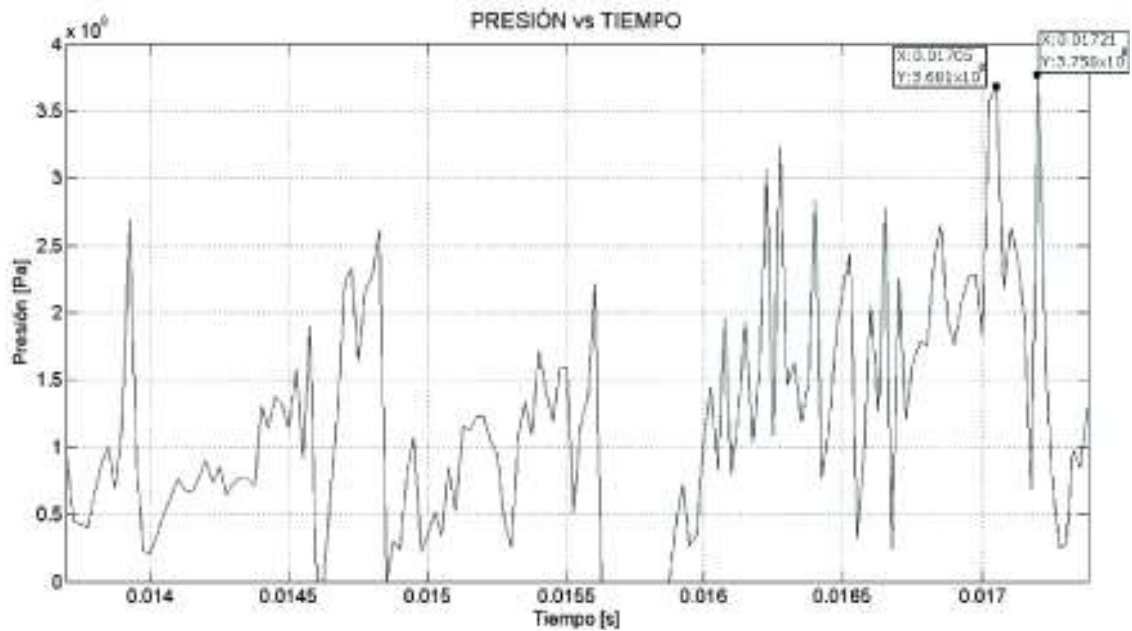


Figura 2.6. Diagrama de presiones máximas.
(Fuente: Propia)

Además, mediante la función del software Paraview “Temporal statistic” se obtienen los datos de presión de impacto máxima sobre las regiones del ala como se muestra Figura 2.7. Al dejar solamente los 5 valores máximos de presión se obtiene la Figura 2.8, determinando que se requiere colocar por lo menos cuatro sensores, dos por cada lado.

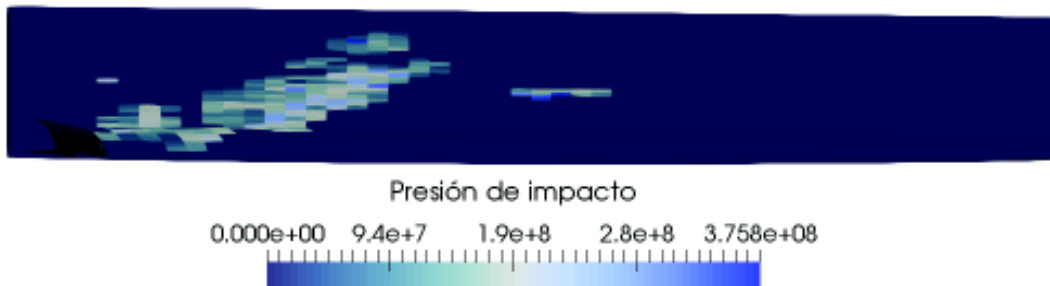


Figura 2.7. Valore máximos de presiones de impacto sobre el ala.
(Fuente: Propia)

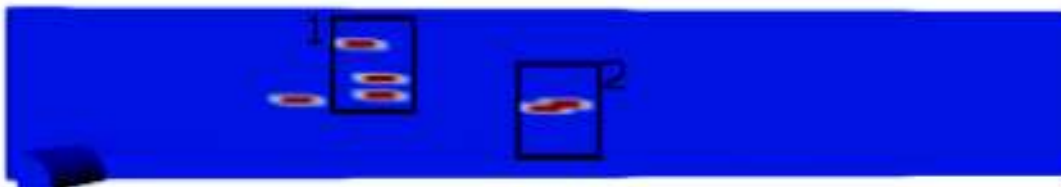


Figura 2.8. Zona de presiones máximas.
(Fuente: Propia)

2.1.6. Tamaño del sensor

Para determinar el tamaño del sensor se considera que, cuando ocurre el colapso de las burbujas de varios tamaños, los impactos no inciden necesariamente en el centro del transductor como se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Relación entre tamaño del transductor y tamaño de la burbuja que colapsa. (Fuente: [22])

Momma et al. [22] y Soyoma et al. [36] investigaron el efecto que causa el tamaño del tamaño del transductor en la que se determina que si el tamaño del transductor no es lo suficientemente grande en comparación al tamaño de las cavidades, las lecturas pueden ser erróneas [36]. Definiendo que para transductores con áreas por debajo de 25mm^2 , se tiene lecturas engañosas (efecto borde) [36]. A medida que aumenta el área del transductor, el valor del impacto se independiza de su área como se muestra en la Figura 2.10 [22].

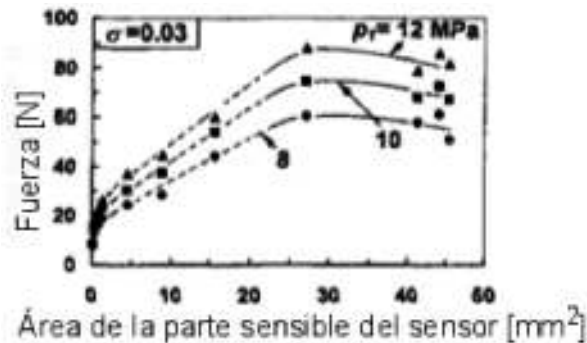


Figura 2.10. Variación del valor del impacto con el tamaño del transductor. (Fuente: [36])

2.2. Sensores

Para la selección del sensor, se requiere determinar la posición de impacto y la magnitud de presión asociada a dichos microjets. Por lo que los sensores estudiados se centran en la medición directa de impactos de alta magnitud de presión y su localización. De acuerdo al análisis previo se tiene que los sensores que se pueden utilizar deben ser piezoeléctricos o galgas extensiométricas [37].

Por las presiones que se manejarán, que serán presiones dinámicas de $1,12 \times 10^6$ [Pa] en un área de 40 [mm²], se determina que los sensores a utilizar deben tener las características mínimas indicadas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características mínimas de los sensores.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Presión inicial	P_o	613,6	kPa
Presión máxima del jet	P_{max}	1,12	GPa
Frecuencia de impacto	f	1×10^4	kHz
Temperatura de trabajo	T_o	20	°C
Área mínima	A_{si}	> 25	mm ²
Cantidad de sensores	N	≥ 2	

(Fuente: Propia)

El fabricante que ofrecen los sensores con las medidas adecuadas y que dan mejor información de los sensores es Dynasen Inc [26].

Con las especificaciones de la Tabla 2.3, se tiene que los sensores que pueden ser utilizados son los sensores piezoeléctricos PVDF o piezoresistivo de manganina del fabricante Dynasen [26], cuyas características son las mostradas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características de sensores analizados.

Parámetro	Símbolo	PVDF	Galga resistiva	Unidades
Área del sensor	A_s	40,32	40,32	mm ²
Frecuencia del sensor	f_s	2	--	GHz
Rango de presión	R_p	0,01-10	0,5-10	GPa
Temperatura de trabajo	T_o	20	20	°C

(Fuente: [26])

2.2.1. Número de sensores y ubicación

De acuerdo con el tamaño y zonas de presión máxima, se determina que el número de sensores a colocarse en el ala es de cuatro, dos por cada zona. La ubicación en el ala es el mostrado en la Figura 2.11.

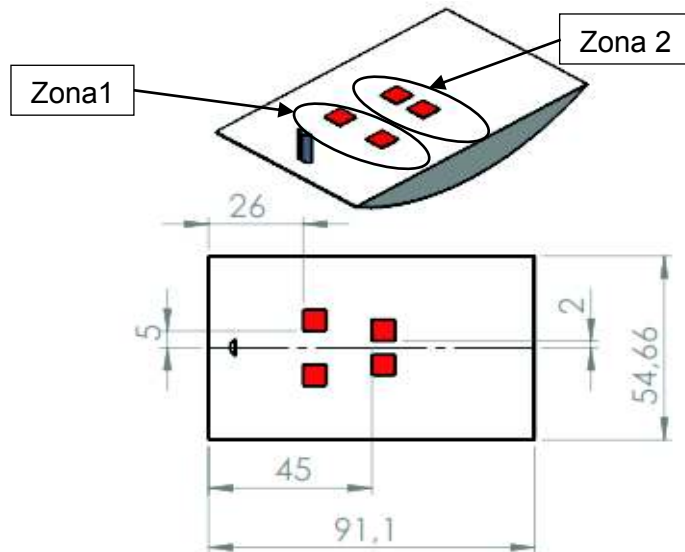


Figura 2.11. Zonas de ubicación del sensor. Medidas en mm y se cumple el criterio espejo. (Fuente: Propia)

2.2.2. Recubrimiento de un sensor

El sensor no puede estar en contacto directo con el agua, por lo que se requiere colocar un recubrimiento que proteja y no cause distorsiones en las medidas. De acuerdo con estudios de Hujer et al.[25], y Piezotech [38] el área activa del sensor debe ser colocado sobre una superficie plana. Los materiales que van a estar en contacto con el o los sensores, no deben ser conductores ni polares. Por lo que, para acoplar y proteger al sensor, se recomienda utilizar pegamento de epoxi o del cianoacrilato, las cuales son no polares y su impedancia mecánica es similar al del PVDF, bajo alta presión para reducir el espesor del pegamento. Además Momma et al.[22], determinó que al aplicar cinta de poliamida como capa de protección, no afecta en gran medida las lecturas de impacto como se muestra en la Figura 2.12 porque la frecuencia natural de la cita y del sensor son de 9.4[MHz] y 10[MHz] respectivamente, pero si es necesario realizar la calibración del sensor [22]. Cada capa de poliamida debe tener un espesor de $70\mu m$.

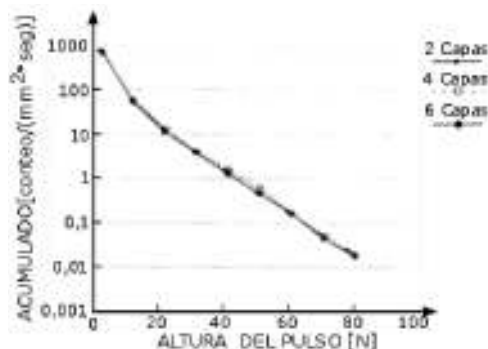


Figura 2.12. Efecto de las cintas de protección en la distribución de los pulsos. (Fuente: [36])

2.3. Simulación del sensor

Una vez escogidos los sensores a utilizar se procede a simular su operación. Se simula su salida en base a la presión de entrada dinámica que medirán. La simulación incluye una etapa de calibración para que la respuesta de los sensores sea de acuerdo con la curva dada por el fabricante, como se indica en la Figura 2.13.

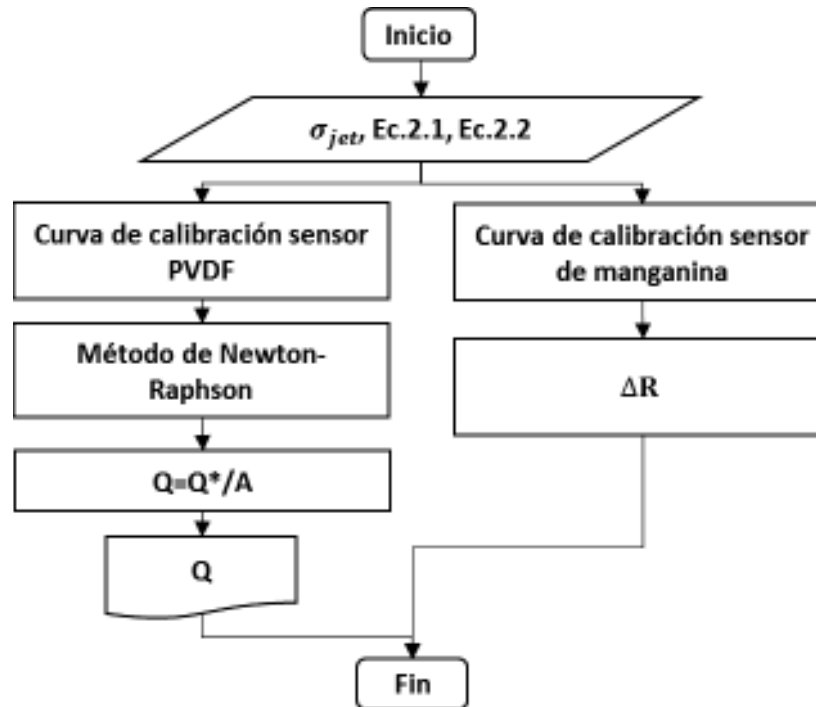


Figura 2.13. Diagrama de flujo de simulación de los sensores.
(Fuente: Propia)

Al sensor ingresan valores de esfuerzo producido en el material debido al colapso de la burbuja. Los valores de esfuerzo son transformados en valores de carga o resistencia dependiendo de cada sensor. Los valores de resistencia o de carga deben ser acondicionados para que ingresen a una tarjeta de adquisición de datos y posteriormente a un computador.

2.3.1. Sensor piezoeléctrico PVDF

Para la simulación del sensor se utiliza la curva de calibración, la cual relaciona la señal de entrada del sensor y su correspondiente señal generada. Para obtener la curva de calibración de un sensor, el fabricante aplica una serie de entradas físicas conocidas y almacena la respuesta de salida para después obtener la curva que mejor se acerca a los valores obtenidos [39]. Para definir una curva de calibración debe

considerarse los siguientes parámetros: Campo de medida, sensibilidad, resolución, histéresis, exactitud, precisión, etc. [39].

La curva de calibración del sensor mostrada en el ANEXO I. es definida mediante la Ecuación 2.1. Curva de calibración del sensor PVDF modelo PVF21-.25-EK.

$$\sigma_{es} = 5,8 \left(\frac{Q}{A}\right) + 3,8 \left(\frac{Q}{A}\right)^{1,6} + 0,55 \left(\frac{Q}{A}\right)^{3,5}$$

Ecuación 2.1. Curva de calibración del sensor PVDF modelo PVF21-.25-EK.
(Fuente: [26])

Para encontrar de forma aproximada las raíces de una función real. Se utiliza el método de Newton-Raphson para determinar la carga (Q) de la Ecuación 2.1. El diagrama de flujo que sigue el método de Newton-Raphson es el mostrado en la Figura 2.14.

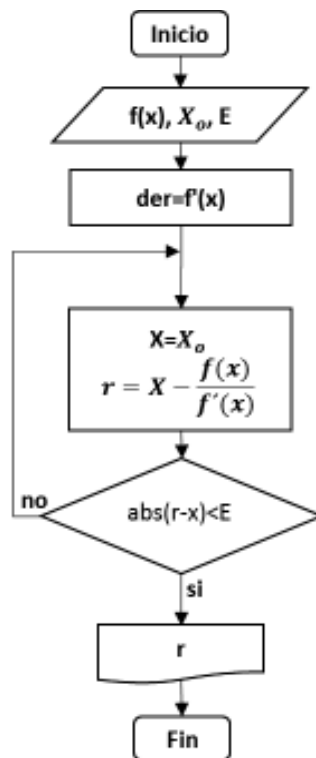


Figura 2.14. Diagrama de flujo del proceso de Newton-Raphson.
(Fuente: Propia)

Zona 1

Al usar el sensor en la zona 1 y simular se tiene como datos de salida los mostrados en la Figura 2.15 y sus valores más representativos en la Tabla 2.5.



Figura 2.15. Gráfica de carga vs. tiempo del sensor 1.
(Fuente: Propia)

La presión generada por la implosión de la burbuja genera que se forme un esfuerzo de igual magnitud, el cual al ser registrado por el sensor produce una carga equivalente como se muestra en la Figura 2.15.

Tabla 2.5. Valores generados por el sensor 1.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Carga máxima de salida	$Q_{\max,1}$	$4,3232 \times 10^{-7}$	C
Carga mínima de salida	$Q_{\min,1}$	$4,2208 \times 10^{-10}$	C
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\text{es,max},1}$	1,12	GPa
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\text{es,min},1}$	613,6	kPa
Tiempo de respuesta	t_{res}	10	ns

(Fuente: Propia)

Zona 2

Al usar el sensor en la zona 2 y simular se tiene como datos de salida los mostrados en la Figura 2.16 y sus datos más representativos los mostrados en la Tabla 2.6. [26]

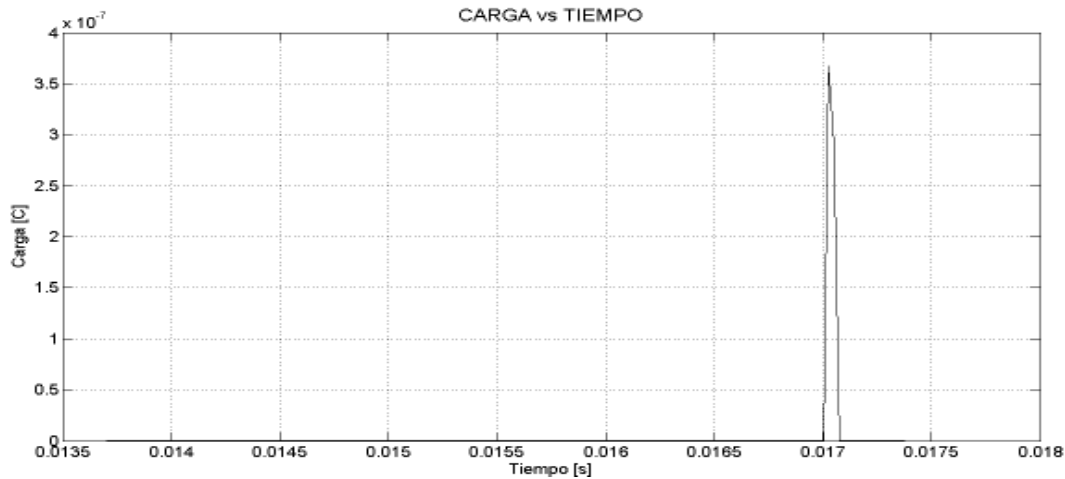


Figura 2.16. Gráfica de carga vs. tiempo del sensor 2.
(Fuente: Propia)

Debido a la presión generada por la implosión de un grupo de burbujas, se tiene que el sensor 2 genera una carga equivalente como la mostrada en la Figura 2.16, además se tiene que existe un solo valor representativo.

Tabla 2.6. Valores generados por el sensor 2.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Carga máxima de salida	$Q_{\max,2}$	$3,672 \times 10^{-7}$	C
Carga mínima de salida	$Q_{\min,2}$	$4,2651 \times 10^{-13}$	C
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\text{es,max},2}$	0,895	GPa
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\text{es,min},2}$	613,6	kPa
Tiempo de respuesta	t_{res}	10	ns

(Fuente: Propia)

2.3.2. Sensor piezoresistivo de manganina

El modelo de sensor piezoresistivo que se analizará es Mn8-50-EK-25, cuyo proveedor es Dynasen Inc. Este tipo de sensor tiene una resistencia interna de $50[\Omega]$. Las características del sensor se muestran en la Tabla 2.7 [26].

Tabla 2.7. Características del sensor Mn8-50-EK-25 [26]

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Área del sensor	A_s	$6,35 \times 6,35$	mm^2
Espesor de la lámina	e_s	0,001	pulg
Presión máxima	P_{\max}	10	GPa
Presión mínima	P_{\min}	0,5	GPa
Resistencia interna	R_o	50	Ω
Resistencia del pin de soldadura	R_{cu}	0,3	Ω
Tiempo de respuesta	t_{res}	~ 10	ns

(Fuente: [26])

La curva característica del sensor piezoresistivo modelo Mn8-50-EK-25 se muestra en el ANEXO II. y se define mediante la Ecuación 2.2.

$$\sigma_x = 4 \frac{\Delta R}{R_0}$$

Ecuación 2.2. Curva característica del sensor piezoresistivo modelo Mn8-50-EK-25.
(Fuente: [26])

Zona 1

Al usar la curva de calibración del sensor piezoresistivo de manganina, se tiene el cambio de resistencia mostrada en la Figura 2.17 y sus valores más representativos en la Tabla 2.8.

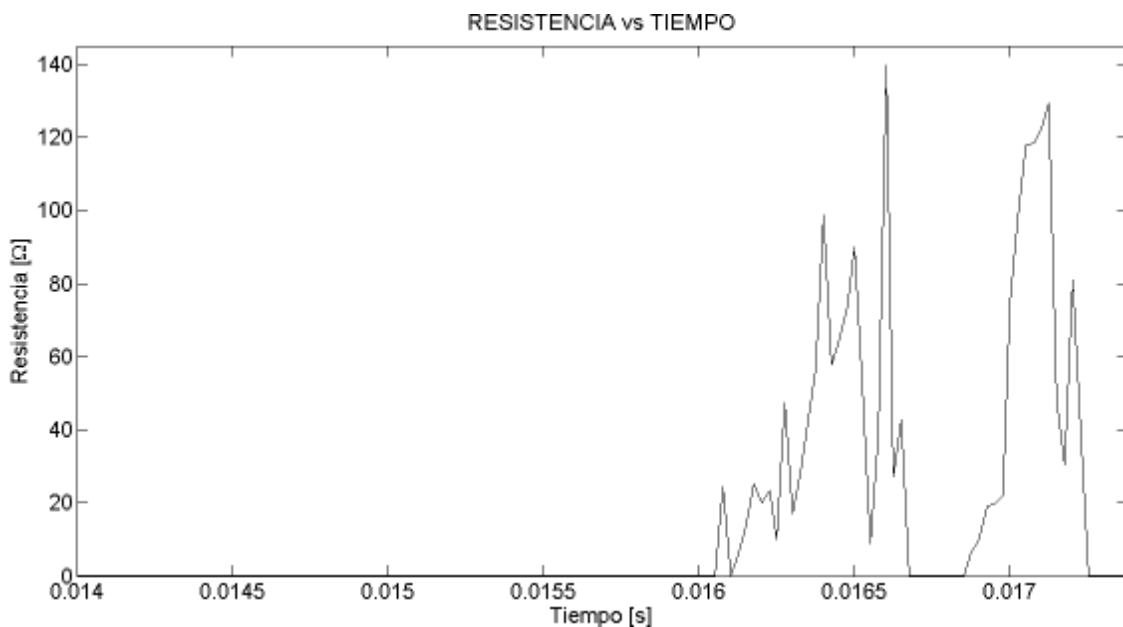


Figura 2.17. Gráfica de resistencia vs. tiempo del sensor piezoresistivo 1 de manganina.
(Fuente: Propia)

Al utilizarse el sensor de manganina se tiene que la implosión de las burbujas generar una resistencia equivalente a las mostradas en la Figura 2.17.

Tabla 2.8. Valores generados por el sensor piezoresistivo 1.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Resistencia máxima de salida	$R_{\max,1}$	139,605	Ω
Resistencia mínima de salida	$R_{\min,1}$	0	Ω
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\text{es,max},1}$	1,12	GPa
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\text{es,min},1}$	613,6	kPa
Tiempo de respuesta	t_{res}	10	ns

(Fuente: Propia)

Zona 2

Al usar la curva de calibración del sensor piezoresistivo de manganina, se tiene el cambio de resistencia mostrada en la Figura 2.18 y sus valores más representativos en la Tabla 2.9.

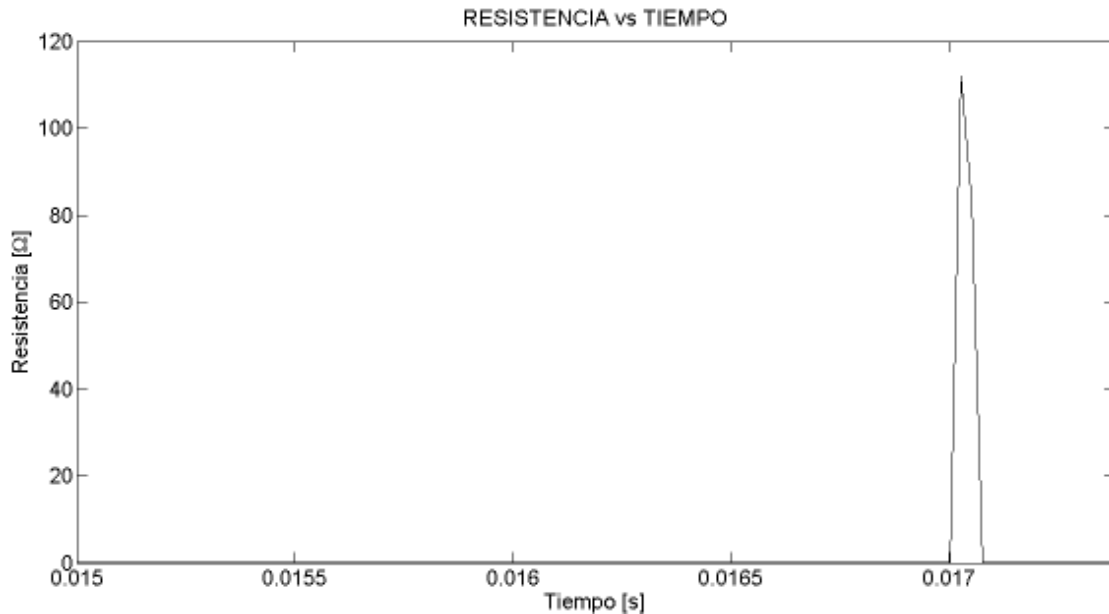


Figura 2.18. Gráfica de resistencia vs. tiempo del sensor piezoresistivo 2 de manganina. (Fuente: Propia).

Tabla 2.9 Valores generados por el sensor piezoresistivo 2.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Resistencia máxima de salida	$R_{max,1}$	$1,119 \times 10^2$	Ω
Resistencia mínima de salida	$R_{min,1}$	0	Ω
Esfuerzo máximo	$\sigma_{es,max,1}$	0,895	GPa
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{es,min,1}$	613,6	kPa
Tiempo de respuesta	t_{res}	10	ns

(Fuente: Propia)

2.4. Acondicionamiento de los sensores

La finalidad del acondicionador es generar una señal que sea aceptable por el dispositivo que se conectara a continuación. En este caso se acondicionará la señal para que entre a un sistema de adquisición de datos y posteriormente a un computador.

2.4.1. Sensor piezoeléctrico PVDF

Como el sensor PVDF se comporta como una fuente de carga [40], para su acondicionamiento se puede usar un acondicionador de carga, o se puede transformar

la carga a corriente mediante una resistencia conectada a su terminales. Lynch et. al. [40], recomienda realizar el acondicionamiento por carga.

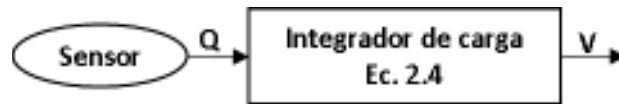


Figura 2.19. Proceso de acondicionamiento del sensor PVDF.
(Fuente: Propia)

Un integrador de carga permite transformar la señal de salida de carga eléctrica de alta impedancia proveniente del sensor en una salida de tensión eléctrica proporcional y de baja impedancia [41], [42].

Además, los amplificadores de carga presentan mejores características para contrarrestar el ruido eléctrico de banda ancha, generado por la polarización inducida por el choque de agua sobre el transductor, que en ocasiones dificulta la calibración y distorsiona la señal que se transmite a los instrumentos de medición [43].

El circuito característico de un amplificador de carga ideal es el mostrado en la Figura 2.20 y considerando las capacitancias parásitas debido a la longitud de los cables se tiene el circuito mostrado en la Figura 2.21. Se debe asegurar que el valor de la capacitancia parásita de los cables sea menor a $10[\text{ns}]$, ya que esto afecta a la constante de tiempo [40].

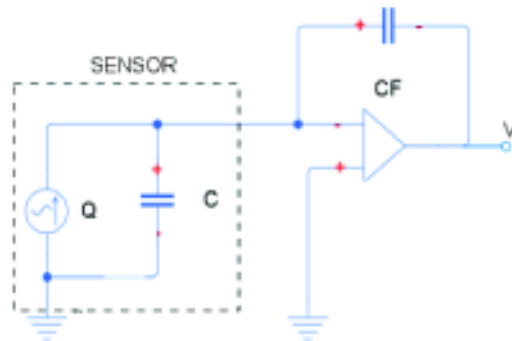


Figura 2.20. Amplificador de carga ideal.
(Fuente: [41])

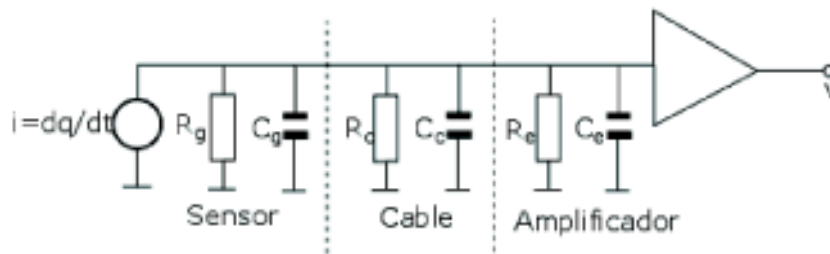


Figura 2.21. Diagrama de un integrador de carga real.
(Fuente: [31])

Como voltaje de salida de un amplificador de carga se tiene la Ecuación 2.3.

$$V_{out} = -V_f = \frac{Q_{in}}{C_f}$$

Ecuación 2.3. Voltaje de salida de un amplificador de carga.

Las características del acondicionador de carga son las indicadas en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Características de los elementos de acondicionamiento.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Capacitancia del transductor	C	100	Pf
Capacitancia del amplificador	C ₂	10	GPa
Tiempo de respuesta	t _{res}	~10	ns
Resistencia del amplificador	R	50	Ω

(Fuente: Propia)

Como integrador de carga se selecciona el modelo CI-50-01, porque puede ser usado para acondicionar medidas de presión altas y además cuenta con las características mostradas en la Tabla 2.11 [30], que cumplen lo que se necesita.

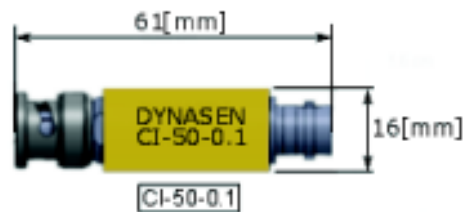


Figura 2.22. Integrador de carga modelo CI-50-0.1.

(Fuente: [30])

Tabla 2.11. Características del integrador de carga modelo CI-50-01.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Capacitancia del amplificador	C ₂	0,1	μF
Rango de presión	R _p	0 - 30	GPa
Resistencia del amplificador	R	50	Ω
Tiempo de respuesta	t _{res}	~20	ns

(Fuente:[26])

Al acondicionar la señal de salida del sensor 1, se tiene la gráfica de Voltaje vs. Tiempo que se muestra en la Figura 2.23. Esta señal transformada a voltaje puede ser ingresada a la tarjeta de adquisición de datos.

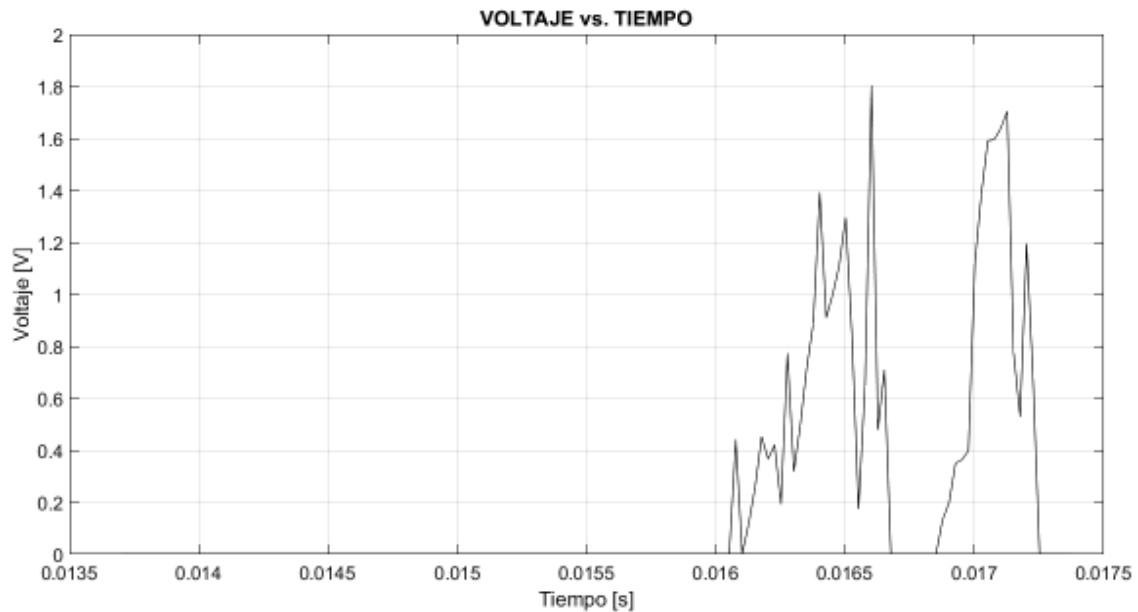


Figura 2.23. Gráfica de voltaje vs. tiempo del sensor 1.
(Fuente: Propia)

Al acondicionar la señal de salida del sensor 2, se tiene la gráfica de Voltaje vs. Tiempo que se muestra en la Figura 2.24

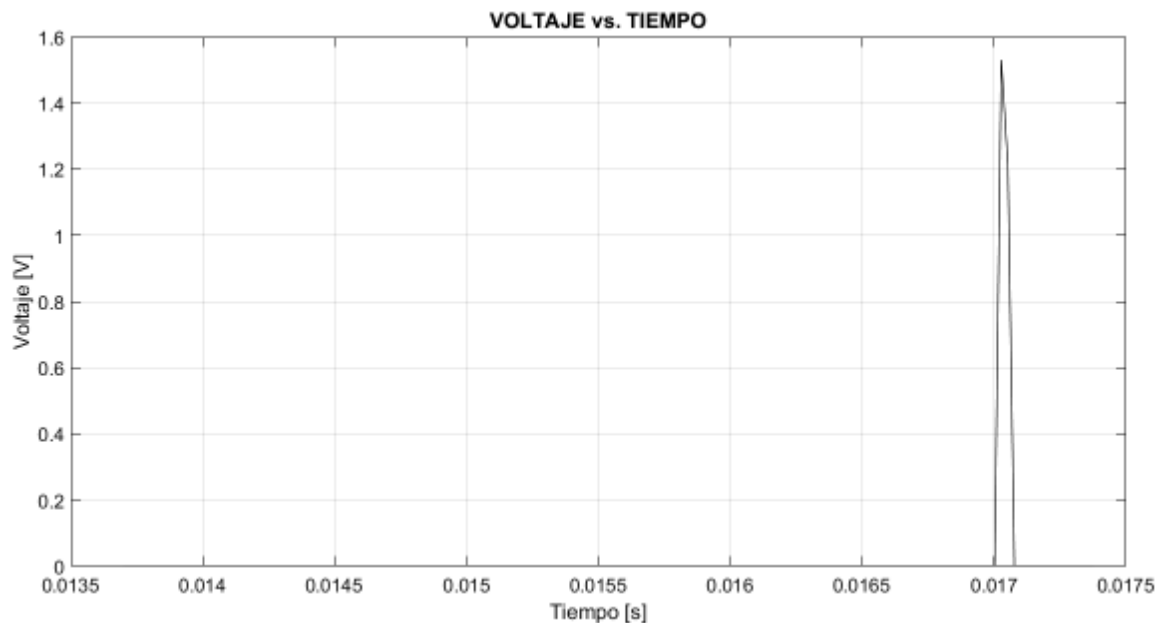


Figura 2.24. Gráfica de voltaje vs. tiempo del sensor 2.
(Fuente: Propia)

2.4.2. Sensor piezoresistivo de manganina

Las diferencias de presión son registradas con un cambio en la resistencia, por lo que se requiere un cambio a voltaje para que pueda ser ingresada al sistema de adquisición de datos. El proceso que sigue el acondicionamiento del sensor de manganina es el mostrado en la Figura 2.25.



Figura 2.25. Acondicionamiento sensor piezoresistivo de manganina.
(Fuente: Propia).

Para transformar de cambios de resistencia a cambios de voltaje, se utiliza una fuente de pulsos. El proveedor de los sensores que se analizan en el presente proyecto recomienda utilizar una fuente de pulsos piezoresistiva CK2-50.



Figura 2.26. Fuente de pulsos piezoresistiva CK2-50.
(Fuente: [26])

La fuente de pulsos está compuesta de un arreglo de un puente de Wheatstone, por lo tanto, el voltaje de salida se puede obtener mediante la Ecuación 2.4.

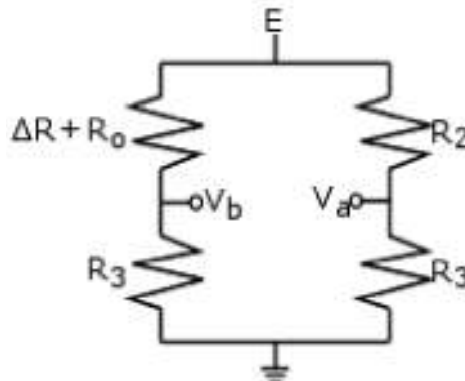


Figura 2.27. Puente del circuito utilizado en la fuente de pulsos.
(Fuente: [44]).

$$V_b = \frac{E \cdot R_3}{R_3 + R_0 + \Delta R}$$

$$V_a = \frac{E \cdot R_3}{R_3 + R_2}$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = E \cdot R_3 \left(\frac{1}{R_3 + R_2} - \frac{1}{R_3 + R_0 + \Delta R} \right)$$

Ecuación 2.4. Ecuación de acondicionamiento del sensor piezoresistivo.
(Fuente: [44]).

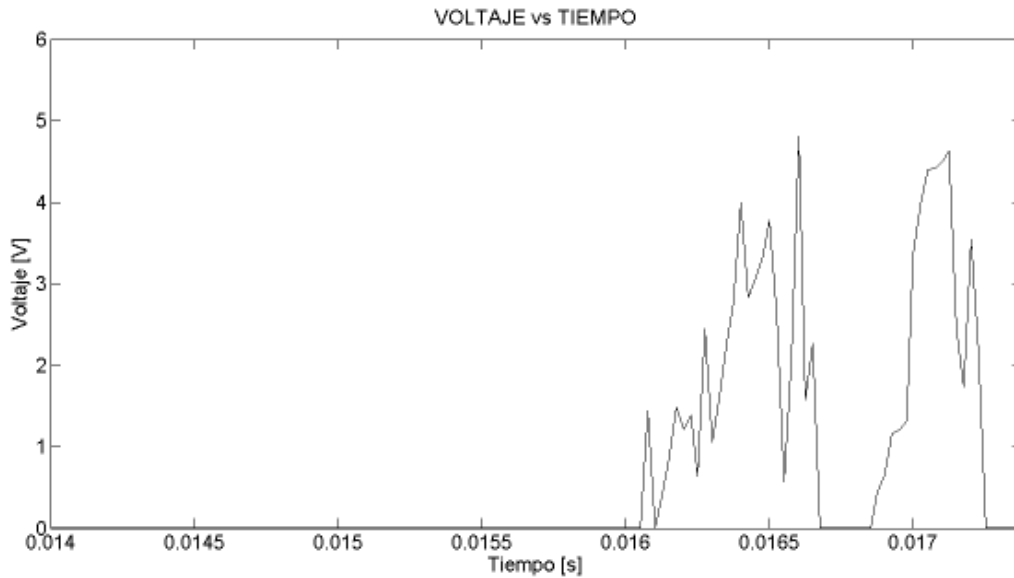


Figura 2.28. Gráfica Voltaje vs. tiempo. Sensor 1.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.12 Valores de voltaje generados por el puente en el sensor 1.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Voltaje máximo de salida	$V_{\max,1}$	4,8065	V
Voltaje mínimo de salida	$V_{\min,1}$	0,005336	V

(Fuente: Propia)

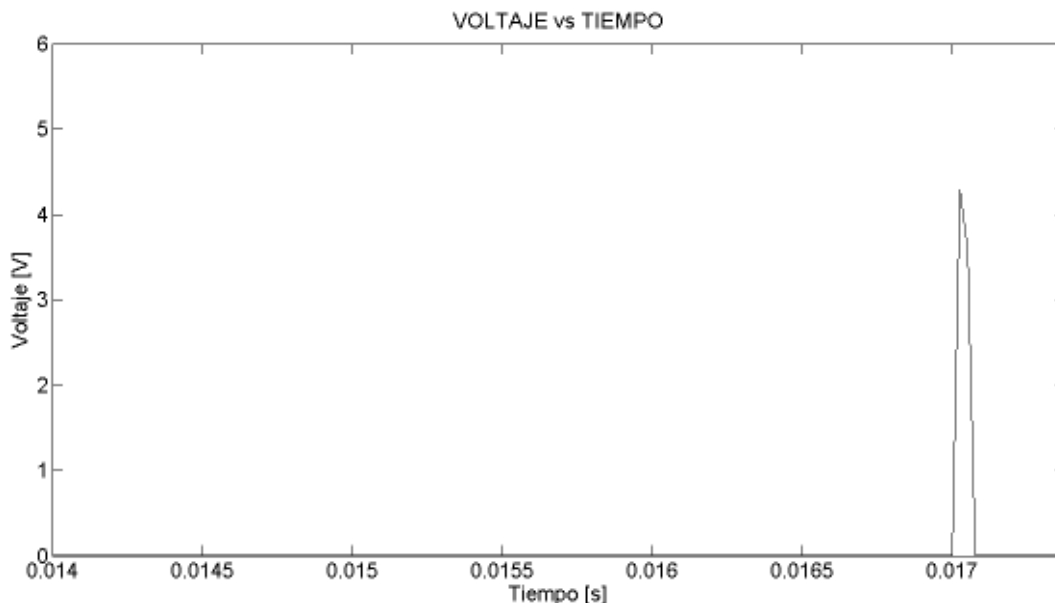


Figura 2.29. Gráfica voltaje vs. tiempo. Sensor 2.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.13. Valores de voltaje generados por el puente en el sensor 2.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Voltaje máximo de salida	$V_{\max,2}$	4,2832	V
Voltaje mínimo de salida	$V_{\min,2}$	0,005336	V

(Fuente: Propia)

2.5. Tarjeta de adquisición de datos

Una tarjeta de adquisición de datos posibilita capturar y/o generar señales reales e interactuar con ellas mediante un ordenador u otros dispositivos electrónicos como se muestra en la Figura 2.30. Su función es convertir señales analógicas provenientes del mundo real a señales digitales, o viceversa [45], [46], [47].

Una tarjeta de adquisición de datos tiene las siguientes características:

- Número de canales analógicos; indica la cantidad de magnitudes diferentes que se puede adquirir con la misma tarjeta.
- Velocidad de muestreo: mejora la representación analógica y siempre es mayor que el doble de la frecuencia de la señal que queremos muestrear.
- Resolución; viene dada por el número de bits de la conversión analógico-digital.
- Rango de entrada; indica los valores entre los que debe estar la señal de entrada para que pueda ser procesada.
- Capacidad de temporización; permite controlar los momentos en los que se debe leer una señal e identifica cuantas veces se ha producido un evento.
- Forma de comunicarse con el computador; puede realizar de dos formas: mediante entrada-salida por interrupción o mediante el acceso directo a memoria, en este ultimo los que el flujo de datos puede ser elevados. [47]



Figura 2.30. Proceso de adquisición de datos.
(Fuente: [46])

Para la adquisición de datos se recomienda utilizar la tarjeta MF 634, la cual es compatible con la Extended Real Time Toolbox para MATLAB. La tarjeta de adquisición multifunción tiene las siguientes características:

- Entradas analógicas unipolares de 14 bits.
- Salidas analógicas de 14 bits.
- Entradas y salidas digitales.
- Contadores y temporizadores.

- Drive para Real-Time Windows Target y para xPC Target.
- Rango de entrada: ± 10 [V]
- Impedancia de entrada: 10^{10} [Ω]

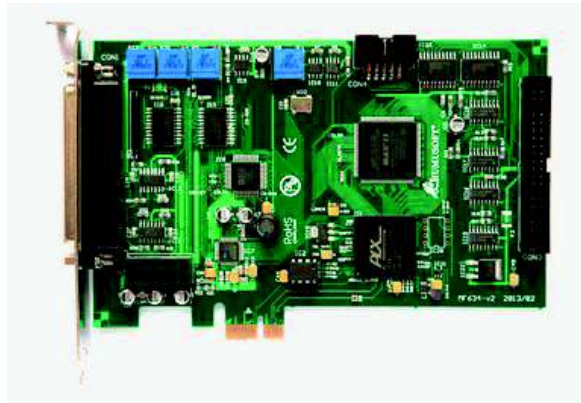


Figura 2.31. Tarjeta de adquisición de datos MF 634.
(Fuente: [48])

2.6. Ambiente de simulación

La simulación del sistema se hizo usando MATLAB por su facilidad de procesamiento de datos. En la Figura 2.32, se muestra la primera pantalla la cual es la pantalla de presentación del programa para la adquisición de datos de impacto.



Figura 2.32. Pantalla principal del visualizador.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.33, corresponde al Menú Principal. Mediante las opciones de la pantalla se puede acceder a la simulación del sensor piezoeléctrico, sensor de manganina, información acerca del fenómeno de cavitación y uso del programa.

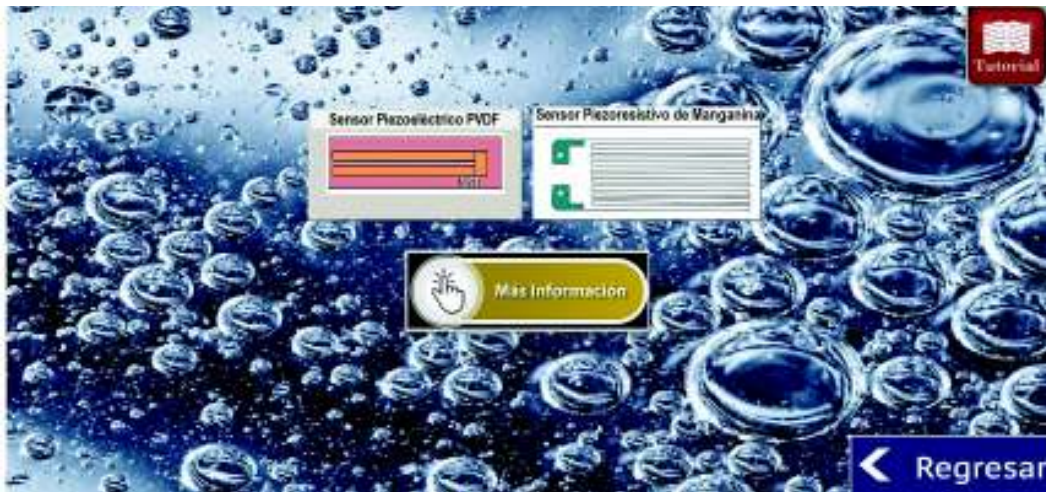


Figura 2.33. Pantalla de "Menú principal".
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.34, se muestra la pantalla de conexiones. A partir de cada una de estas opciones se puede acceder a la pantalla de gráficas de simulación y obtener más información de cada uno de los elementos que se utilizan en la adquisición de datos.



Figura 2.34. Pantalla de conexiones.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.35, indica las gráficas de simulación. Esta pantalla da opciones de eliminar datos impacto, seleccionar puntos de la simulación, realizar un aumento de zonas que se desea analizar, entre otros comandos.

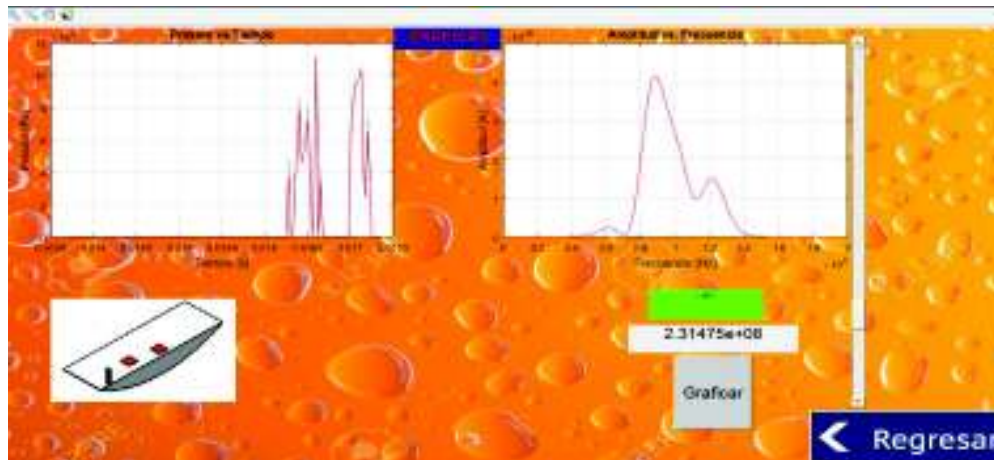


Figura 2.35. Visualizador de gráficas.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.36 presenta la pantalla “Más información” en la cual se da más detalles de cómo se produce el proceso de cavitación, los tipos de cavitación que existen y los principales daños causados por este fenómeno.



Figura 2.36. Pantalla de "Más información".
(Fuente: Propia)

2.7. Evolución del área afectada

Al variar parámetros como la velocidad del flujo de entrada (U_∞), ángulo de incidencia (\widehat{AOB}) y número de cavitación (σ); se provoca el cambio en el tamaño de la nube de cavitación y en el área afectada por la cavitación [1].

Para las condiciones usadas, se tiene que la evolución y la acumulación de región afectada por cavitación se presentan de la forma mostrada en la Figura 2.37 y Figura 2.38, respectivamente.

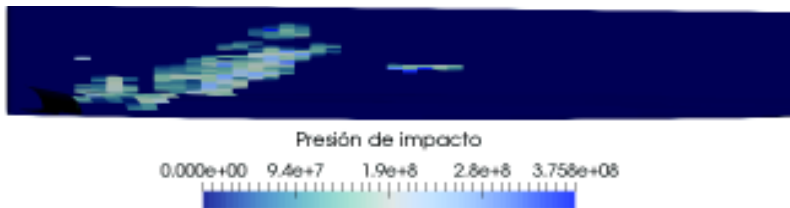


Figura 2.37. Área afectada por la cavitación. Valores en [Pa].
(Fuente: Propia)

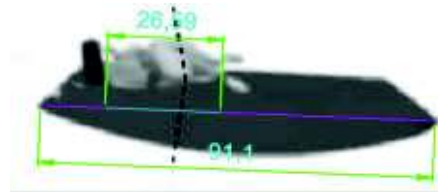


Figura 2.38. Proceso de cavitación para el primer caso con obstáculo. Valores en mm.
(Fuente: [1])

Aplicando la razón de crecimiento de la burbuja cuando se encuentra sin obstáculo y trasponerlo en la región afectada por erosión, se tiene que el crecimiento es el mostrado en Figura 2.39 y las condiciones de operación en la Tabla 2.14.

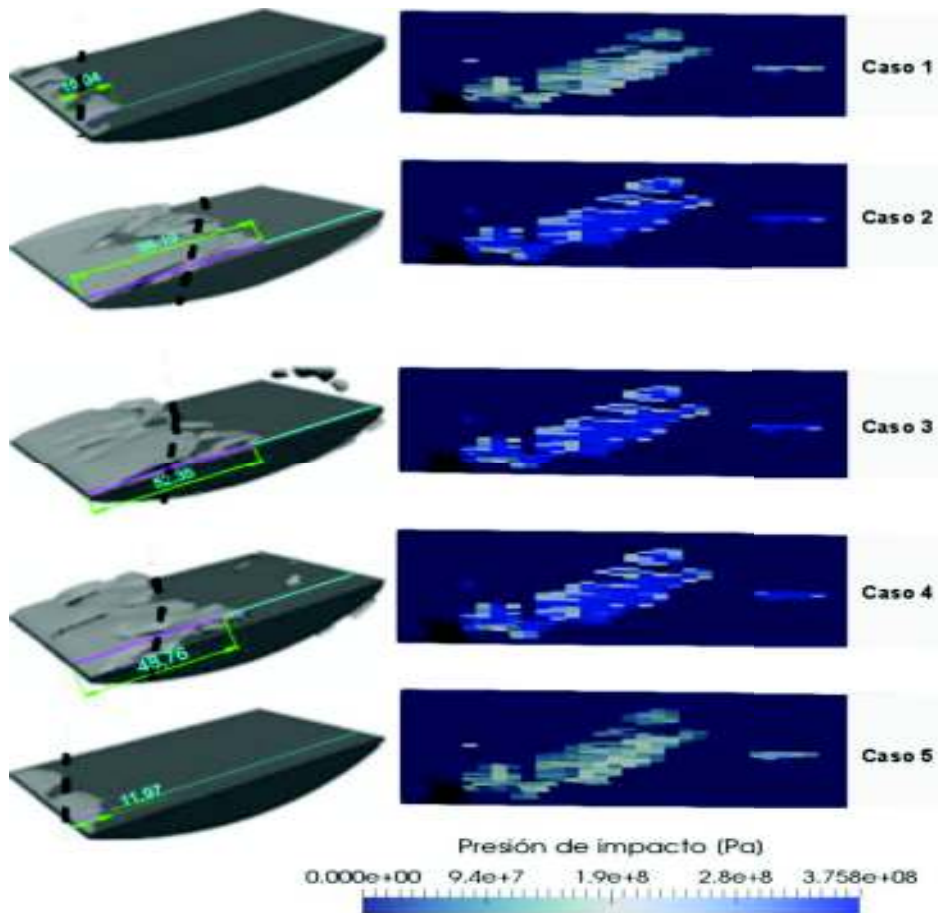


Figura 2.39. Evolución de la cavitación y del área de impacto. Valores de long. en mm.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.14. Condiciones de operación y evolución de la cavidad.

	SIN OBSTACULO					CON OBSTACULO					UNIDADES
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	
σ	1	0,7	0,7	0,7	1,12	1	0,7	0,7	0,7	1,12	
\overline{AoB}	3	2,3	3	3	3	3	2,3	3	3	3	°
U_{∞}	35	35	25	35	35	35	35	25	35	35	m/s
P_{∞}	613,58	430,19	220,6	430,19	680,82	613,58	430,19	220,6	430,19	680,82	kPa
Long. Crecimiento	15,04	56,19	52,35	48,76	11,97	26,59	99,3412	92,5523	86,2053	21,1624	mm
Razón incremento	1,000	3,736	3,481	3,242	0,796	1,000	3,736	3,481	3,242	0,796	

(Fuente: Propia)

2.8. Análisis de costos

A continuación, se presenta los costos referenciales de la instalación del sistema para la obtención de datos de impacto usando el sensor PVDF y sensor piezorresistivo.

Tabla 2.15. Costos de referencia para la obtención de datos de impacto al usar un sensor PVDF.

ELEMENTO	MODELO	CANTIDAD	PRECIO c/u	PRECIO TOTAL
Sensor PVDF	PVF211-.25-EK	4	170,4	681,6
Amplificador de carga	CI-50-0.1	4	600	2400
Tarjeta de adquisición de datos	NI PCLe-6320	1	640	640
Cables de conexión BCN - Pig tail	CA-1147-5	4	21,1	84,4
Recubrimiento	Epoxi Eastman 910	2	18,82	37,64
Otros		1	20	20
Total				3863,64

(Fuente: Propia)

Tabla 2.16. Costos de referencia para la obtención de datos de impacto al usar un sensor piezorresistivo.

ELEMENTO	MODELO	CANTIDAD	PRECIO c/u	PRECIO TOTAL
Sensor piezorresistivo Manganin 50 [ohm]	Mn8-50-EK-25	4	126,3	505,2
Fuente de pulsos	CK2-50/0,050-300	1	8340	8340
Tarjeta de adquisición de datos	NI PCLe-6320	1	640	640
Cables de conexión BCN - Pig tail	CA-1147-5	4	21,1	84,4
Cables de conexión BCN - BCN	CA-1147-7	2	29,05	58,1
Recubrimiento	Epoxi Eastman 910	2	18,82	37,64
Otros		1	20	20
Total				9685,34

(Fuente: Propia)

2.9. Evaluación y selección de la mejor alternativa

Considerando el uso del sensor PVDF y del sensor piezoresistivo de manganina con sus respectivos elementos de acople recomendados por el fabricante, es necesario realizar una evaluación de estas que nos permita determinar la solución más idónea para la medición. Por ellos se utiliza el método ordinal corregido de criterios ponderados [49].

Esta forma de evaluación permite decidir entre diversas alternativas, con solo tener el orden de preferencia de la evaluación global. Se fundamenta con tablas, donde cada criterio se examina con los restantes criterios y se le asigna valores, donde: el valor 1 se da si el criterio es de mayor importancia que el otro, de 0.5 si dos criterios tienen valores iguales de importancia y de 0 si el criterio es de menor importancia que el otro criterio evaluado [49].

Criterios de valoración:

- Fiabilidad; para evitar que cualquier fallo, provoque un contratiempo apreciable o que los valores medidos sean erróneos.
- Costo; es una limitación por el valor de los sensores y a la cantidad que se requieren en cada prueba.
- Tamaño; debido a que tanto el tamaño del ala hidrodinámica como del equipo para ensayarlo es limitado.
- Rango de funcionamiento; debe ser alto debido a que al variar en poca cantidad el ángulo, me crea impactos mayores, originando un daño rápido del sensor.
- Velocidad de respuesta; debe ser capaz de responder al cambio en el valor de impacto, en un tiempo mínimo.

Se tiene como alternativas:

- **Solución A:** Sensor PVDF y elementos de acople.
- **Solución B:** Sensor piezoresistivo y elementos de acople.

Tabla 2.17. Evaluación del peso específico de cada criterio.

Fiabilidad > Velocidad de respuesta > Rango de funcionamiento > Tamaño = Costo

Criterios	Fiabilidad	Velocidad	Rango	Tamaño	Costo	$\Sigma+1$	Ponderado
Fiabilidad		1	1	1	1	5	0,33
Velocidad	0		1	1	1	4	0,27
Rango	0	0		1	1	3	0,2
Tamaño	0	0	0		0,5	1,5	0,1
Costo	0	0	0	0,5		1,5	0,1
					SUMA	15	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.18. Evaluación del peso específico del criterio fiabilidad.

Solución A > Solución B

FIABILIDAD	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución A		1	2	0,67
Solución B	0		1	0,33
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.19. Evaluación del peso específico del criterio velocidad de respuesta.

Solución A = Solución B

VELOCIDAD	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución A		0,5	1,5	0,5
Solución B	0,5		1,5	0,5
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.20. Evaluación del peso específico del criterio rango.

Solución A > Solución B

RANGO	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución A		1	2	0,67
Solución B	0		1	0,33
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.21. Evaluación del peso específico del criterio tamaño.

Solución A = Solución B

TAMAÑO	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución A		0,5	1,5	0,5
Solución B	0,5		1,5	0,5
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.22. Evaluación del peso específico del criterio costo.

Solución A > Solución B

COSTO	Solución A	Solución B	Σ+1	Ponderado
Solución A		1	2	0,67
Solución B	0		1	0,33
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.23. Tabla de conclusiones.

CONCLUSION	Fiabilidad	Velocidad	Rango	Tamaño	Costo	Σ	Prioridad
Solución A	0,222	0,133	0,133	0,05	0,067	0,606	1
Solución B	0,111	0,133	0,067	0,05	0,033	0,394	2

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos y su respectivo análisis se muestran a continuación.

3.1. Graficas usando sensores PVDF

En la Figura 3.1, se muestra la gráfica de Presión vs. Tiempo de los datos obtenidos del estudio numérico usando el modelo de erosión por cavitación propuesto por Hidalgo [1] y la gráfica obtenida después de haber sido captada por los sensores PVDF.

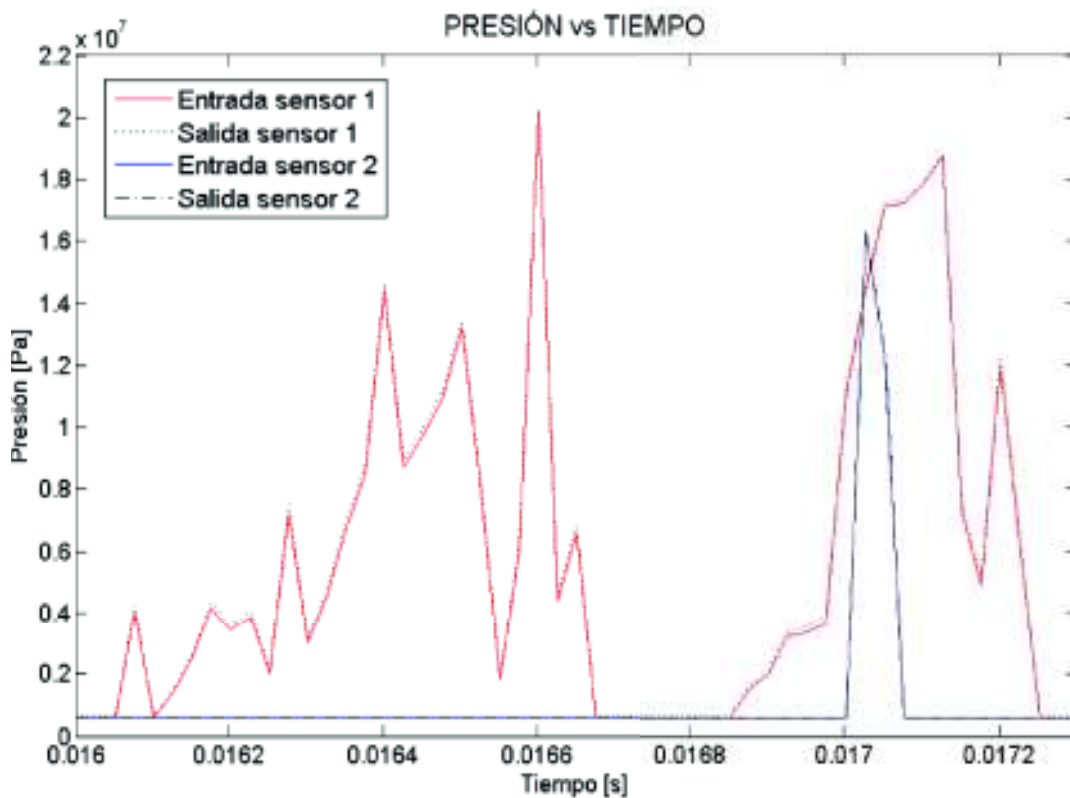


Figura 3.1. Gráficas de Presión vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y los datos de salida de los sensores PVDF.
(Fuente: Propia).

Para el sensor 1, se observa que para tiempos menores a $1,6 \times 10^{-2}$ [s] no se tiene impactos de presión considerables, el valor de presión es el mínimo.

Además, puede observar que al tiempo $1,66 \times 10^{-2}$ [s] se tiene la mayor presión la que equivale a $2,02 \times 10^7$ [Pa], tanto para el valor obtenido utilizando el estudio numérico como la simulación realizada después de ser captada mediante el sensor.

Para el segundo valor máximo se tiene en el tiempo $1,713 \times 10^{-2} [s]$ con un valor de presión de $1,88 \times 10^7 [Pa]$ para el obtenido mediante el estudio numérico y de $1,874 \times 10^7 [Pa]$ para el obtenido mediante el sensor como se muestra en Figura 3.2.

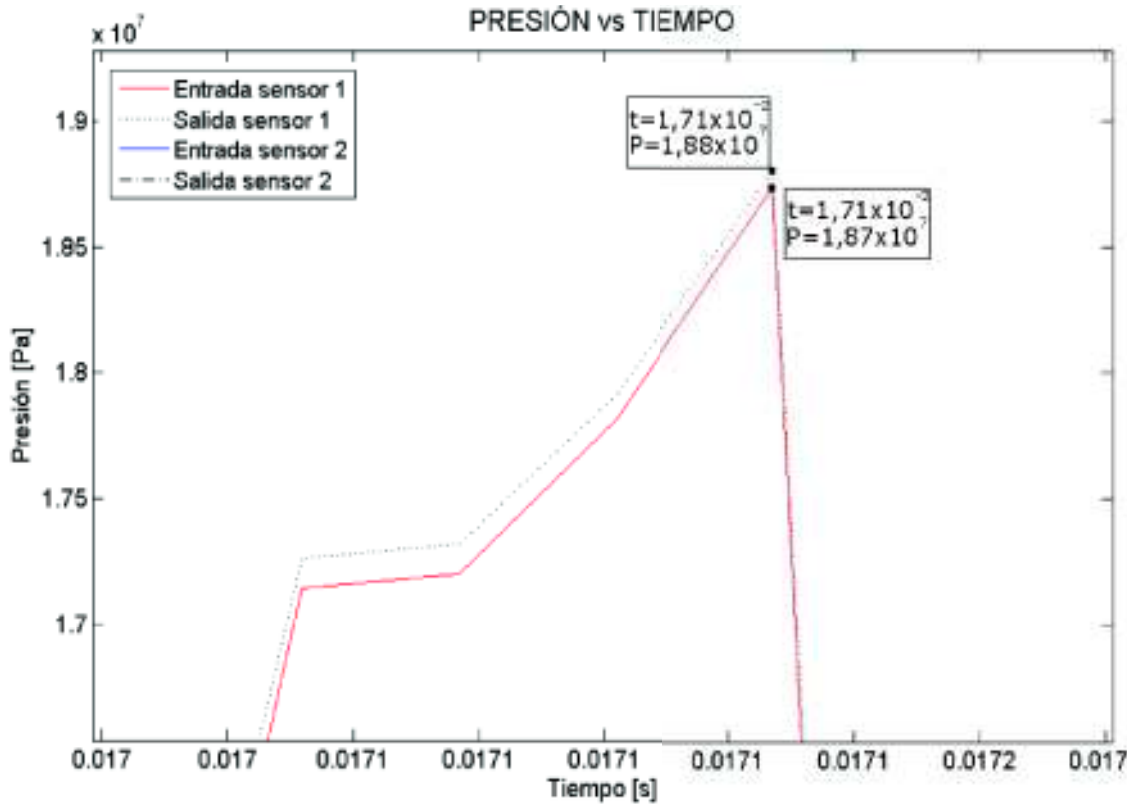


Figura 3.2. Gráficas Presión vs. Tiempo del estudio numérico y los datos de salida de los sensores PVDF para el segundo valor de mayor presión. (Fuente: Propia).

Los otros valores de presión, no se consideran por ser pequeños en comparación a los altos valores.

Para el sensor 2, se tiene que para tiempo de simulación menor a $1,10^{-2} [s]$ no se tiene impactos por implosión de la burbuja.

En el tiempo $1,703 \times 10^{-2} [s]$, se tiene una presión de impacto de $1,632 \times 10^7 [Pa]$, y es la misma tanto en el estudio numérico como en el sensor.

La diferencia existente entre la gráfica obtenida mediante el estudio numérico y el sensor es debida a que la curva de calibración no tiene una relación lineal con su salida.

3.2. Graficas usando sensores piezoresistivos de manganina

En la Figura 3.3 se muestra la Grafica de Presión vs. Tiempo tanto el estudio numérico como para los datos obtenidos después de los impactos sobre el sensor piezoresistivo de manganina.

En la zona 1, se observa que el mayor valor de presión se da al tiempo $1,66 \times 10^{-2}$ [s] y de presión un valor de $2,02 \times 10^7$ [Pa], como segundo valor alto, se da en el tiempo $1,713 \times 10^{-2}$ [s] con una presión de $1,876 \times 10^7$ [Pa] y como tercer valor alto se da en el tiempo $1,708 \times 10^{-2}$ [s] con una presión de $1,725 \times 10^7$ [Pa].

En la zona 2, se tiene que el mayor valor de presión se da al tiempo $1,703 \times 10^{-2}$ [s] y tiene una presión de $1,632 \times 10^7$ [Pa].

Para todos los valores antes mencionados son iguales para el estudio numérico como para lo obtenido después de la simulación. Ambas graficas coinciden debido a que la curva de calibración característica del sensor es lineal.

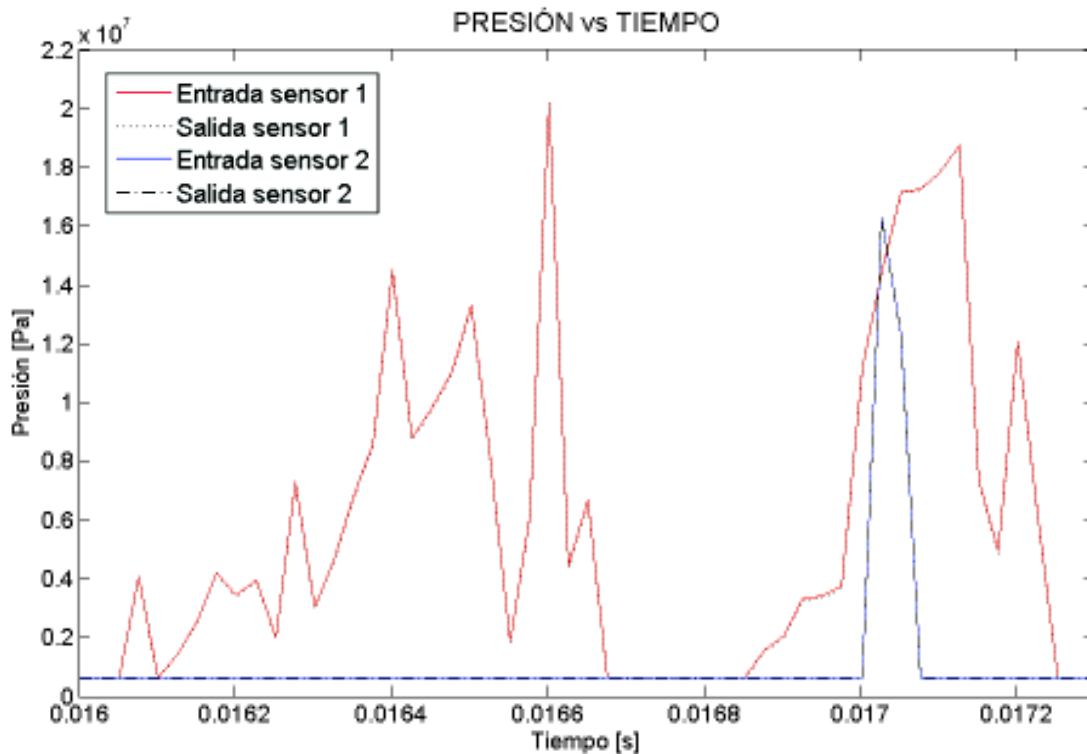


Figura 3.3. Gráficas de Presión vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y los datos de salida del sensor 1 piezoresistivo.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.1 y Figura 3.3, se tiene que los valores máximos no sobrepasan el valor de $2,02 \times 10^7$ [Pa], coincidiendo con los resultados obtenidos por Escaler, en la que indica que los impactos más fuertes han sido por debajo de 1200 [N] [5].

3.3. Análisis espectral

El análisis espectral se usa para la descomposición de una señal compleja en bandas de frecuencia más simples para analizar las frecuencias que más nos interesan y determinar si el sensor que se emplea permite captar el fenómeno analizado [50].

Para poder interpretar correctamente el espectro se debe conocer los siguientes puntos [50]:

- Las formas de representación del espectro (unidades de frecuencia, escala de densidad espectral, etc.).
- Conocer la forma de los espectros de ciertos procesos.
- Como afectan los filtros al espectro.

En la Figura 3.4, se muestra el análisis espectral del sensor en la zona 1. La misma que después de eliminarse presiones a partir de un rango, empieza a acentuarse la señal en 1800 [Hz]. Las presiones recortadas corresponden a otros fenómenos que no tienen que ver con el proceso de cavitación.

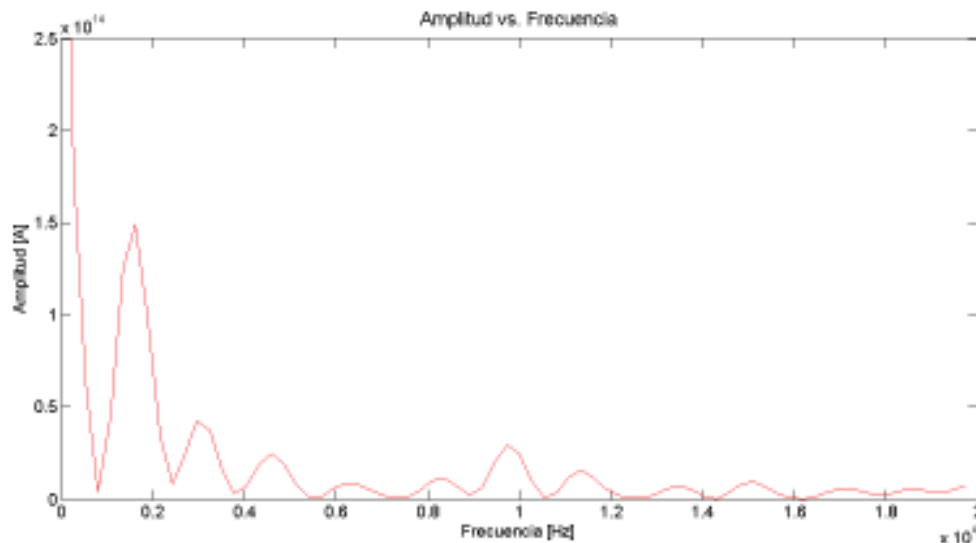


Figura 3.4. Gráficas de Amplitud vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y de los datos de salida del sensor 1 PVDF.
(Fuente: Propia).

En la Figura 3.5, se muestra el análisis espectral del sensor en la zona 2. La misma que después de aplicarse un filtro pasa-banda se tiene una frecuencia de 8000 [Hz].

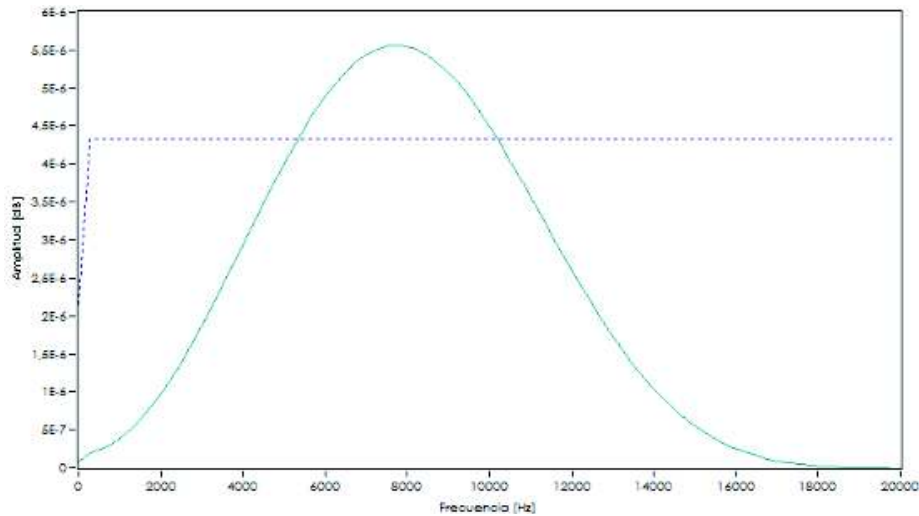


Figura 3.5. Gráficas de Amplitud vs. Tiempo de los datos del estudio numérico y de los datos de salida del sensor 2 PVDF.
(Fuente: Propia).

3.4. Selección de la mejor alternativa

En la Tabla 2.23 se muestra las conclusiones de aplicar el método ordinal corregido de criterios ponderados [49]. La Solución A, corresponde al uso de sensores piezoeléctricos y la Solución B corresponde al uso de sensores piezoresistivos para captar los valores de impacto de cavitación.

Tabla 2.23. Tabla de conclusiones.

CONCLUSIÓN	Fiabilidad	Velocidad	Rango	Tamaño	Costo	Σ	Prioridad
Solución A	0,222	0,133	0,133	0,05	0,067	0,606	1
Solución B	0,111	0,133	0,067	0,05	0,033	0,394	2

(Fuente: Propia)

Aunque mediante simulación; con el sensor piezoresistivo de manganina se consigue obtener valores muy cercanos a los calculados mediante el estudio numérico, al realizar el análisis de la mejor alternativa considerando: la fiabilidad, velocidad de respuesta, rango de trabajo, tamaño y costo; se tiene que el uso de sensores piezoeléctricos PVDF es la mejor alternativa. Además, para un diseño no es necesario conocer valores intermedios de impacto, sino los más valores altos y su ubicación.

3.5. Evolución del área afectada por la cavitación

En la Tabla 3.1, se muestra como es la razón de incremento y la longitud de crecimiento de la nube de cavitación variando el número de cavitación (σ), ángulo de incidencia (\widehat{AoB}), flujo de entrada (U_{∞}) y presión de los alrededores (P_{∞}).

Tabla 3.1. Condiciones de operación y evolución de la cavidad.

	SIN OBSTACULO					CON OBSTACULO					UNIDADES
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	
σ	1	0,7	0,7	0,7	1,12	1	0,7	0,7	0,7	1,12	
\widehat{AoB}	3	2,3	3	3	3	3	2,3	3	3	3	°
U_{∞}	35	35	25	35	35	35	35	25	35	35	m/s
P_{∞}	613,58	430,19	220,6	430,19	680,82	613,58	430,19	220,6	430,19	680,82	kPa
Long. Crecimiento	15,04	56,19	52,35	48,76	11,97	26,59	99,3412	92,5523	86,2053	21,1624	mm
Razón incremento	1,000	3,736	3,481	3,242	0,796	1,000	3,736	3,481	3,242	0,796	

(Fuente: Propia)

El mayor incremento de la nube de cavitación se produce cuando se reduce tanto el ángulo de incidencia como el número de cavitación y el menor incremento se produce cuando se aumenta el número de cavitación manteniendo el ángulo de incidencia.

Al observar la Figura 2.39, se tiene que incrementar el área afectada por la cavitación en los cuatro primeros casos, pero además que los valores de presiones de impacto no aumentan.

Al variar los parámetros físicos, aumenta el área afectada por la cavitación. Originando que se cambie el lugar de colocación de los sensores o se aumente el número de sensores.

Al cambiar los parámetros físicos, se tiene un aumento en el área afectada, mas no aumenta la magnitud del jet de impacto producida por la implosión de las cavidades ubicadas a la distancia que generan daño.

3.6. Comparación para validación

3.6.1. Antecedentes

Escaler et al. [5], en el artículo “Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using Surface-mounted obstacles”, presentó un proceso de prueba de erosión por cavitación

utilizando un túnel de cavitación de alta velocidad y un ala hidrodinámica convexa con obstáculo. El obstáculo tiene como propósito el acelerar la acumulación de daño en la superficie del ala hidrodinámica mediante la generación de vórtices de cavitación. Las condiciones de operación hidrodinámica son las mostradas en la Tabla 3.2, y son las mismas que las usadas por Hidalgo[1] para validar su modelo de erosión.

Tabla 3.2. Condiciones de operación experimental.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidades
Velocidad del fluido en la entrada	U_{∞}	35	m/s
Número de cavitación	$\frac{\sigma}{A\theta B}$	1	
Ángulo de ataque		3	grados

(Fuente: [5])

Para comparar y validar sus resultados, utilizo los resultados obtenidos en un generador de cavitación de vórtice y en un aparato de vibración, los cuales son usados en este tipo de pruebas. Para la prueba utilizó un ala hidrodinámica de acero inoxidable.

3.6.2. Validación

Para la validación de los resultados obtenidos mediante simulación, se compara las gráficas de Área de picadura vs. Fuerza de impacto, tanto de la simulación de los sensores como de los resultados experimentales obtenidos por Escaler[5].

Para determinar el área de picadura, se parte de estudios realizados por Dular et al. [20] en la que señala que una parte de la energía contenida en una cavidad y que luego es liberada en el proceso de cavitación es usada para alcanzar la condición de flujo plástico del material y el resto de la energía es convertida en energía de deformación. Luego Lush [51], determino que la velocidad crítica estimada puede ser usada para obtener la deformación plástica ocasionada por el impacto normal de una porción de líquido sobre un material sólido y puede ser calculada por Ecuación 3.1.

$$\mu_{cri} = \sqrt{\frac{P_y}{\rho_l} \left(1 - \left(1 + \frac{P_y}{B} \right)^{-1/n} \right)}$$

Ecuación 3.1. Velocidad crítica.
(Fuente: [51])

Donde P_y es el límite de elasticidad del material, B y n son coeficientes estandar relacionados con el líquido, y sus valores son de 300 [MPa] y 7 respectivamente para

el agua. [1], [51], [52]. Para determinar el valor de volumen deformado, se tiene la Ecuación 3.2, determinada por Hidalgo [1].

$$V_{\text{def}} = \frac{2\alpha_o}{(8,97 \cdot \gamma^2)^2} \times \left(\frac{U_{\text{jet}} - U_{\text{crit}}}{U_{\text{jet}}} \right) \cdot V$$

$$V_{\text{def}} = \pi r_{\text{def}}^2 h_{\text{def}}$$

Ecuación 3.2. Volumen de deformación.
(Fuente: [1])

Además mediante la Ecuación 3.3, se tiene la relación media entre el radio y la profundidad de la picadura [20], [53].

$$r_{\text{def}} = 26,7 x h_{\text{def}}$$

Ecuación 3.3. Relación entre radio y profundidad de picadura.
(Fuente: [20], [53])

Considerando la Ecuación 1.3, Ecuación 3.1, Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3, se determina el radio y el área de picadura con la Ecuación 3.4 y Ecuación 3.5, respectivamente.

$$r_{\text{def}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{def}} \cdot 26,7}{\pi}}$$

Ecuación 3.4. Radio de picadura.
(Fuente: [20])

$$A_{\text{def}} = \pi r_{\text{def}}^2$$

Ecuación 3.5. Área de picadura.
(Fuente: [20])

Al aplicar la Ecuación 3.5 en el estudio numérico, se tiene el area de picadura en función de la fuerza aplicada, como se muestra en la Figura 3.6.

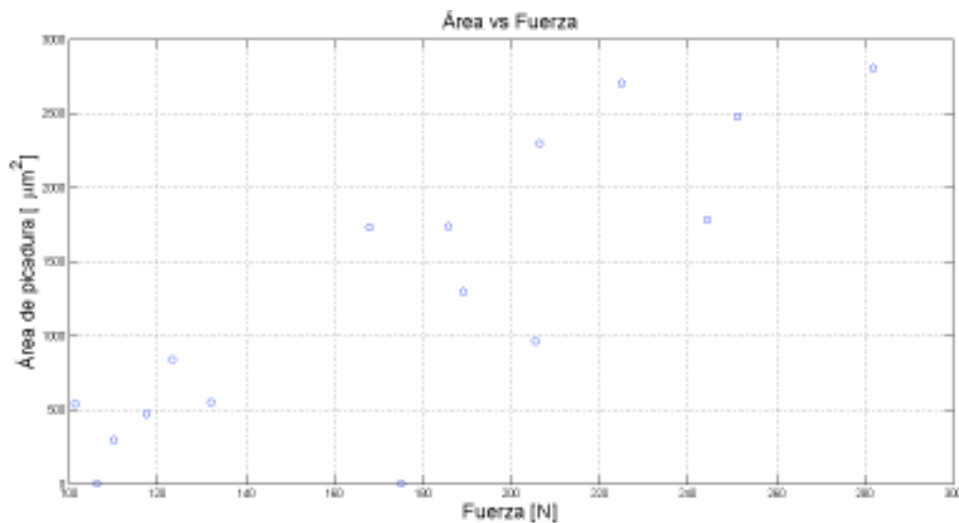


Figura 3.6. Área de picadura vs. Fuerza de impacto.
(Fuente: Propia)

3.6.3. Comparación

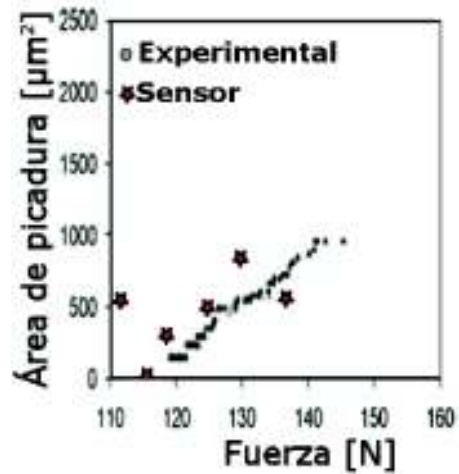


Figura 3.7. Comparación entre resultados experimentales y resultados de la simulación del sensor.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.7 se puede observar que la Gráfica de Área de picadura vs. Fuerza obtenida después de captar los impactos debido a implosión de burbujas mediante los sensores, tienen la misma tendencia de los resultados obtenidos por Escaler [5].

4. CONCLUSIONES

Se tiene que el sensor aceptable para medir impactos de cavitación sobre un ala convexa con obstáculo es mediante el uso de sensores PVDF, reconociendo también los trabajos de investigación y experimentales realizados por otros autores en casos similares, pero con otros tipos de ala y bajo condiciones diferentes de flujos de cavitación.

Se desarrolló exitosamente el estudio numérico para la obtención de presiones de impacto generadas por la implosión de cavidades, además se obtuvo las pantallas de visualización adecuadas para observar la presión de impacto, fuerza y velocidades sobre el ala convexa con obstáculo semi-cilíndrico.

Se determinó cual es la zona apropiada para la colocación de sensores y el tamaño que debe tener los sensores para evitar lecturas erróneas, tomando en cuenta consideraciones iniciales de experimentos similares.

Mediante investigaciones, se determinó que el espesor de la protección colocada sobre el ala hidrodinámica no afecta en gran cantidad. Además, el uso de productos de la misma marca permite optimizar el mejor uso de cada uno de los componentes utilizados para la medición, porque el acoplamiento de impedancias ya es considerado entre dispositivos de la misma marca. Mientras que, si se utiliza dispositivos diferentes a los recomendados, se debe considerar que las impedancias cumplan los rangos de acoplamiento.

Aunque el uso del sensor PVDF para obtener cada una de las presiones en comparación al piezoresistivo no es tan buena. Es mucho mejor, porque para un diseño es necesario conocer los valores máximos, mas no los intermedios.

Trabajos futuros

Aunque el presente trabajo brinda una base significativa para la medición de los impactos mediante sensores debido a la implosión de cavidades, se puede seguir mejorando en los siguientes puntos:

- Se recomienda realizar la simulación para comprobar si la razón de crecimiento de la burbuja y del área afectada concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

- Se recomienda utilizar una malla de sensores y comparar los resultados en las zonas donde se colocaron los sensores.
- En el presente trabajo se llegó a elegir cual es el número de sensores, tipo y ubicación idónea, como trabajos posteriores se puede implementar los sensores en un ala hidrodinámica con las características descritas para comparar con los resultados del estudio numérico del presente trabajo.
- Se tiene que, al variar el ángulo de impacto, incremento el área afectada por la cavitación, por tanto, se propone como futuros trabajos demostrar mediante simulación el incremento de la zona afectada variando tanto la velocidad del flujo a la entrada como el ángulo de impacto.

Referencias Bibliográficas

- [1] V. Hidalgo, «Numerical study on unsteady cavitating flow and erosion based on homogeneous mixture assumption», Tesis Doctoral, Universidad de Tsinghua, Beijing, 2016.
- [2] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Balance Nacional de Energía Eléctrica», *Agencia de Regulación y Control de Electricidad*.
- [3] V. Hidalgo, X. Luo, X. Escaler, B. Ji, y A. Aguinaga, «Implicit large eddy simulation of unsteady cloud cavitation around a plane-convex hydrofoil», *Elsevier*, pp. 815-823, oct. 2015.
- [4] X. Escaler, P. Dupont, y F. Avellan, «Experimental investigation on forces due to vortex cavitation collapse for different materials», *Elsevier*, pp. 65-74, 1999.
- [5] X. Escaler, M. Farhat, F. Avellan, y E. Egusquiza, «Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using surface-mounted obstacles», *Elsevier*, pp. 441-449, feb. 2003.
- [6] J.-P. Franc y J.-M. Michel, *Fundamentals of Cavitation: 76*, 1 edition. Springer Netherlands, 2006.
- [7] C. E. Brennen, *Hydrodynamics of Pumps*. Cambridge University Press, 2014.
- [8] V. Hidalgo, X. Luo, A. Peña, E. Valencia, R. Soto, y A. Yu, «Benefits of hydropower research in Ecuador using OpenFOAM based on CFD technology», presentado en IX Congreso de Ciencia y Tecnología - ESPE 2014, Sangolquí - Ecuador, 2014, vol. 9, pp. 1-5.
- [9] J. Baquero, «Implicit large Eddy simulation for unsteady cavitating Flow around hydrofoils using OpenFOAM software.», Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 2015.
- [10] M. Wosnik, L. Gomez, y R. Arndt, «Measurements in high void-fraction bubbly wakes created by ventilated supercavitation», *ASME*, pp. 1-8, jun-2005.
- [11] R. Benavente, «Supercavitación, la tecnología que nos permitirá volar bajo el mar.», *El confidencial*, 26-ago-2014.
- [12] J. Bin, X. Luo, Y. Zhang, Y. Wu, y H. Xu, «Numerical investigation of the ventilated cavitating Flow around an under-water vehicle based on a three-component cavitation model», jun. 2010.
- [13] «Un torpedo chino movido por supercavitación alcanzaría San Francisco en 100 minutos», *RT en Español*. [En línea]. Disponible en: <https://actualidad.rt.com/actualidad/view/138288-torpedo-chino-alcanzara-san-francisco-minutos>. [Accedido: 20-oct-2017].
- [14] C. E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*, 1.^a ed. Pasadena. California: Oxford University Press, 1995.
- [15] P. Kottke, S. Bair, y W. Winer, «Shear cavitation», presentado en World Tribology congress III, Washington, 2005, p. 2.
- [16] C. Lyer y S. Ceccio, «The influence of developed cavitation on the flow of a turbulent shear layer.», *Am. Inst. Phys.*, vol. 14, n.º 10, p. 3414, sep. 2002.
- [17] P. Eisenberg, «Cavitation». Hydronautics incorporated.
- [18] A. Peters, H. Sagar, y O. Moctar, «Numerical modelling and prediction of cavitation erosion», *WEAR*, vol. 338, pp. 189-201, sep. 2015.
- [19] D. Himmelblau, *Principios básicos y cálculos en ingeniería química*, 6.^a ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2002.
- [20] M. Dular, B. Stoffel, y B. Sirok, «Development of a cavitation erosion model», *WEAR*, vol. 261, pp. 642-655, ener 2006.
- [21] J. Rodríguez y R. Marín, *Fisicoquímica de aguas*. Madrid: Diaz de Santos, 1999.
- [22] T. Momma y A. Lichtarowicz, «A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation», *Dep. Mech. Eng.*, pp. 425-436, 1995.

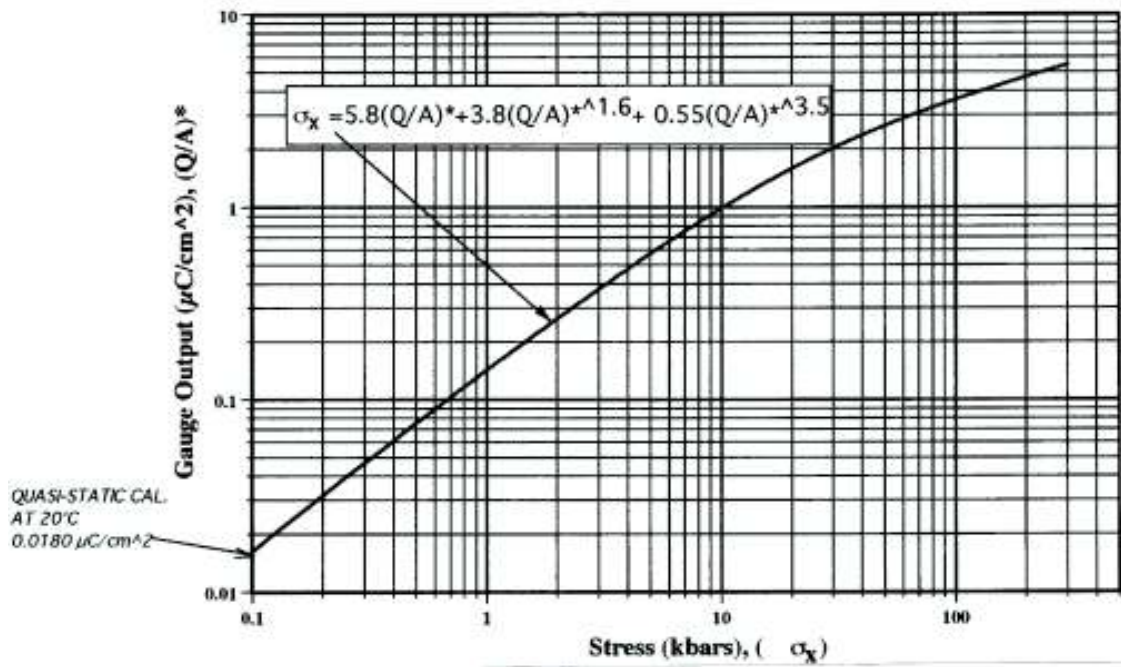
- [23] H. Soyama, A. Lichtarowicz, T. Momma, y E. Williams, «A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement».
- [24] P. Gustavson, D. Tasker, y J. Forbes, «PVDF pressure transducers for shock wave and explosives research», *Nav. Surf. Warf. Cent.*, pp. 1-17, 1994.
- [25] J. Hujer, J. Carrat, M. Müller, y M. Riondet, «Impact load measurements with a PVDF pressure sensor in an erosive cavitating flow», presentado en Noveno Simposio Internacional sobre cavitación, Lausana, Suiza, 2015, pp. 1-4.
- [26] Dynasen, «Thin Film Sensors», *dynasen.com*, 18-ago-2017. [En línea]. Disponible en: <http://dynasen.com/product-category/thin-film-sensors/>. [Accedido: 18-ago-2017].
- [27] L. Córdoba, «Estudio de la respuesta piezoeléctrica en PVDF», Universidad Carlos III, Madrid. España.
- [28] B. Jaffe, *Piezoelectric ceramics*. United State, 1971.
- [29] P. Gustavson, D. Tasker, y J. Forbes, «PVDF pressure transducers for shock wave and explosives research», *Nav. Surf. Warf. Cent.*, pp. 1-17, 1994.
- [30] A. Shirinov y W. Schomburg, «Pressure sensor from a PVDF film», *Univ. Aachen*, abr 2007.
- [31] Omega, «Strain and microstrain units and the history of the gauge sensor», *www.omega.co.uk*. [En línea]. Disponible en: <https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume3/strain.html>. [Accedido: 08-nov-2017].
- [32] Z. Li, «Assessment of cavitation erosion with a multiphase Reynolds-Averaged Navier-Stokes method.», Tesis Doctoral, Delft University of Technology, Delft, Países Bajos, 2012.
- [33] UNAM, *Visualización científica con Paraview*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [34] K. Moreland, *The Paraview tutorial. Version 5.2. Sandia National Laboratories. Mountain view*. California. USA.
- [35] R. Fortes-Patella, A. Archer, y C. Flageul, «Numerical and experimental investigations on cavitation erosion», presentado en 26th Symposium on hydraulic machinery and systems., Beijing, China, 2012, pp. 1-12.
- [36] H. Soyama, A. Lichtarowicz, T. Momma, y E. Williams, «A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement».
- [37] E. Leal, «Sensores de presión», Universidad Francisco de Miranda, 2012.
- [38] PIEZOTECH, «S25 PVDF Sensor Mono-dimensionnal shock pressure measurement-How to use it.»
- [39] J. Alberto, «Características de un sistema de medida.», *Instrumentación I*, sep-2012. .
- [40] C. Lynch y J. Charest, «Practical considerations on the piezofilm gauge technique.», *Shock Compression Condens. Matter*, pp. 901-904, 1991.
- [41] R. Pallás, *Sensores y acondicionadores de señal*, 4.^a ed. Barcelona. España.: Ediciones Marcombo, 2003.
- [42] G. Silva, S. Rojas, y A. Ruiz, «Análisis de la sensibilidad de los amplificadores de carga para acelerómetros.», presentado en 6to Congreso Mexicano de acústica, Oaxaca. México, 1999, vol. 1,2.
- [43] P. Gustavson, D. Tasker, y J. Forbes, «Underwater shock wave measurements using PVDF transducers.», p. 4, 1992.
- [44] H. Vantine, J. Chan, L. Erickson, J. Janzen, R. Weingart, y R. Lee, «Precision stress measurements in serve shockwave environments with lowimpedance manganin gauges», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 51, pp. 116-122, oct. 1979.
- [45] A. Cilento, «Sistemas de control de motores en tiempo real mediante Matlab», Universitat Rovira I Virgili, 2007.
- [46] B. Mihura, *Labview for data acquisition*, 1era ed. Prentice Hall, 2001.

- [47] «Sistemas de adquisición y Procesamiento de datos.pdf». .
- [48] Addlink, «Hardware : MF 634», *Addlink. Software Científico*. [En línea]. Disponible en: <https://www.addlink.es/productos/mf-634#descripcion>. [Accedido: 27-nov-2017].
- [49] C. Riba, *Diseño concurrente*, 1era ed. Barcelona. España.: Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [50] «Análisis espectral y ajuste estacional». oct-2012.
- [51] P. Lush, «Impact of a liquid mass on a perfectly plastic solid.», *J. Fluid Mech.*, vol. 135, pp. 373-387, mar. 1983.
- [52] M. Dular y O. Coutier-Delgosha, «Numerical modelling of cavitation erosion.», *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 61, pp. 1388-1410, feb. 2009.
- [53] J. Reboud, R. Fortes-Patella, y A. Archer, «Analysis of damaged surfaces. Part I. Cavitation mark measurements by 3D laser profilometry», presentado en Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, CA, 1999.

ANEXO I.

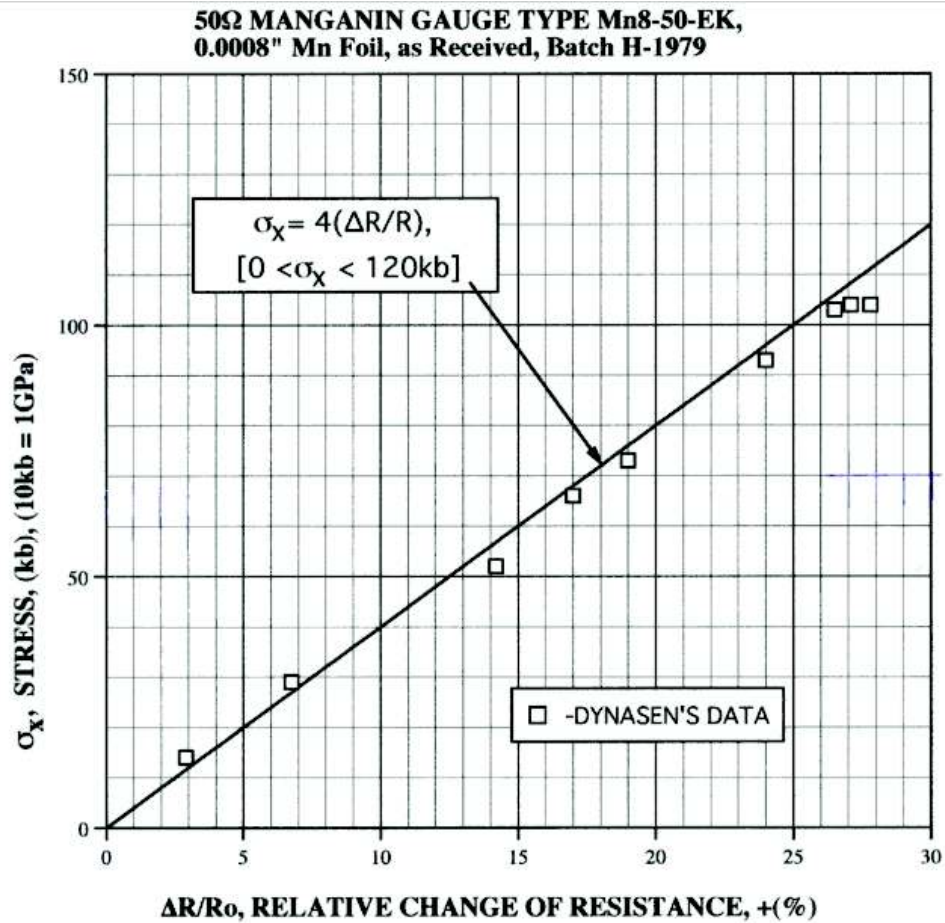
CURVA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR PVDF MODELO PVF21-.25-EK. [26]

OUTPUT OF DYNASEN'S PIEZOFILM STRESS GAUGES, TYPE PVF 2-11 AND PVF 2-4 (AMPS UNIAXIALLY STRETCHED FILM)



ANEXO II.

CURVA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR PIEZORESISTIVO MODELO Mn8-50-EK-25. [26]



ANEXO III.

Diagrama de conexiones para el sensor PVDF recomendado por Dynasen [26].



Dynasen Inc. 20 ARNOLD PLACE
GOLETA, CALIFORNIA, USA 93117
www.dynasen.com , info@dynasen.com
Ph: 805-964-4410



530-0002-00 REV 014 Summary of Dynasen
Stress Gauge and Signal Conditioning Options

A general connection diagram is presented in Fig 3 showing the relatively simple set-up typically used with the PVDF gauge method.

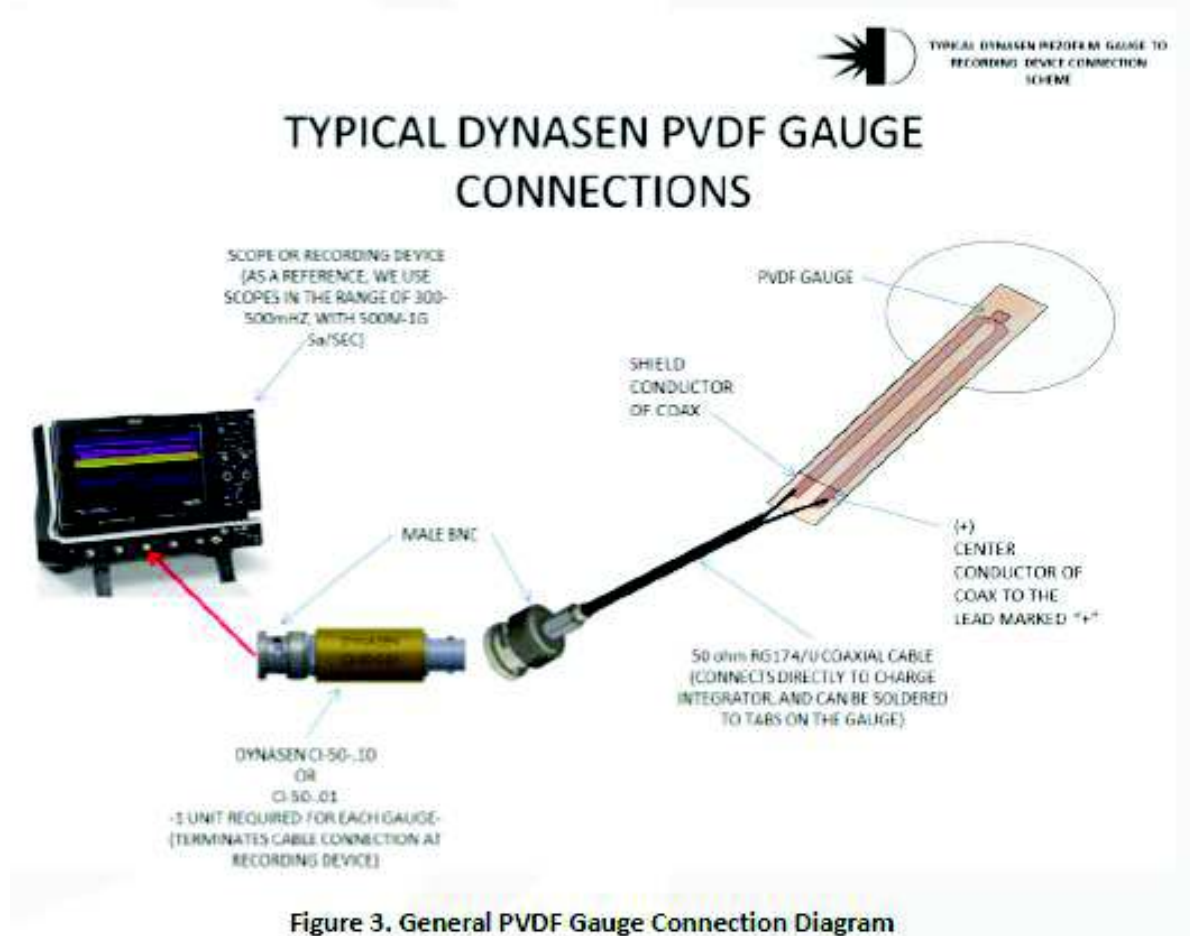


Figure 3. General PVDF Gauge Connection Diagram

ANEXO IV

Diagrama de conexiones para el Sensor de manganina recomendado por Dynasen [26].

530-0002-00 REV 014 Summary of Dynasen
Stress Gauge and Signal Conditioning Options

A generalized test arrangement is provided in Fig 11. other components may be required for testing. This is just to give the end user an over view of the major components that may be required to perform stress measurements using piezoresistive stress gauges.



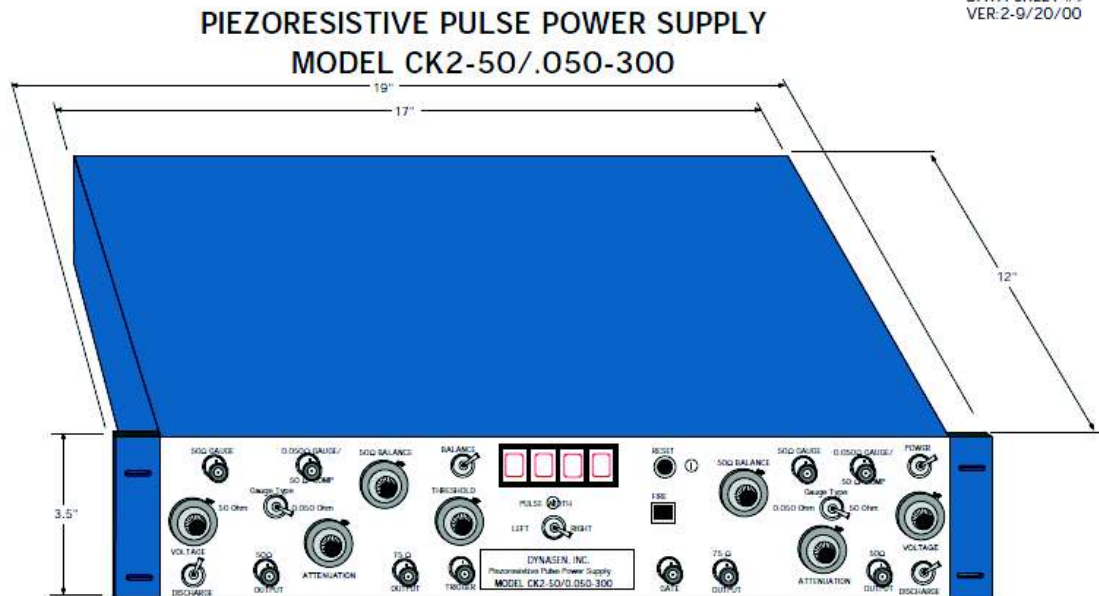
A "Decade" Resistance Box, is a useful tool for 50 ohm gauge resistance change simulations that are used to calculate $(\Delta R)/(R \text{ initial})$ values.



FIGURE 11. Generalized Component Set-up for Dynasen 50 ohm Piezoresistive Gauge Applications

ANEXO V.

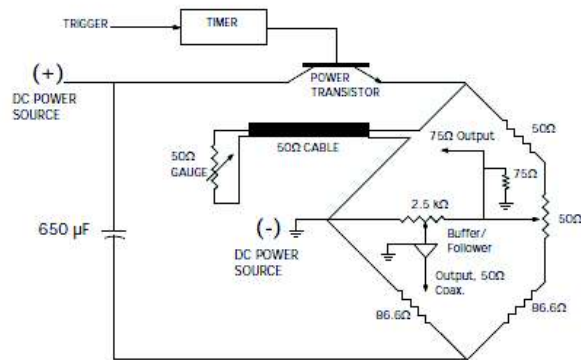
DATA SHEET #7
VER:2-9/20/00



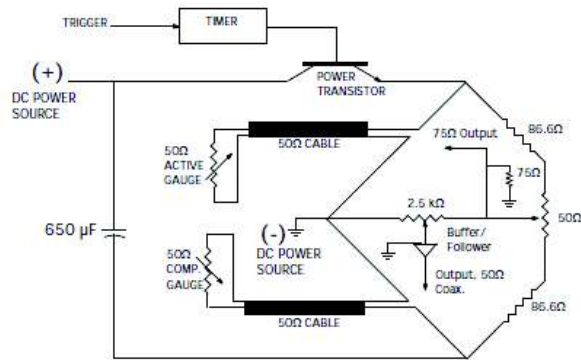
Dynasen's piezoresistive pulse power supply, Model CK2-50/.050-300, is a unique and most advanced pulse bridge arrangement of its kind that can be used for the excitation of 50Ω or .050Ω (low-impedance) shock pressure gauges. Its basic features are:

1. 115/230 AC power input. No batteries.
2. Dual-channel capabilities with either 50Ω or .050Ω gauge modes. One channel can be used with a 50Ω gauge while the other can be used with a .050Ω gauge or vice-versa.
3. Constant voltage full bridge arrangement for 50Ω gauges and constant current one-half bridge arrangement for .050Ω gauges. Each channel can be set in either 50Ω or .050Ω mode using a single front panel switch.
4. Differential gauge arrangement (50Ω gauges only) for compensating or canceling temperature, strain, or noise effects (see page 2 of data sheet for bridge arrangements #1, #2 and #3).
5. Continuously adjustable charge voltage for each channel from 30 to 300 volts.
6. Easy bridge balancing features (50Ω gauges only) with front panel digital display.
7. Unattenuated 75Ω bridge output and continuously adjustable 50Ω / line driver output for each channel.
8. Front panel pulse width adjustment (5 μsec to 500 μsec, nominally set at 100 μsec) with an equal duration gate output.
9. Single manual or electrical trigger capability with manual (or remote reset optional) capability.
10. Continuously adjustable trigger level from 4.0 to 50 volts.
11. All rotating knobs are self-locking verniers.
12. Aluminum chassis for rack mount or table use.

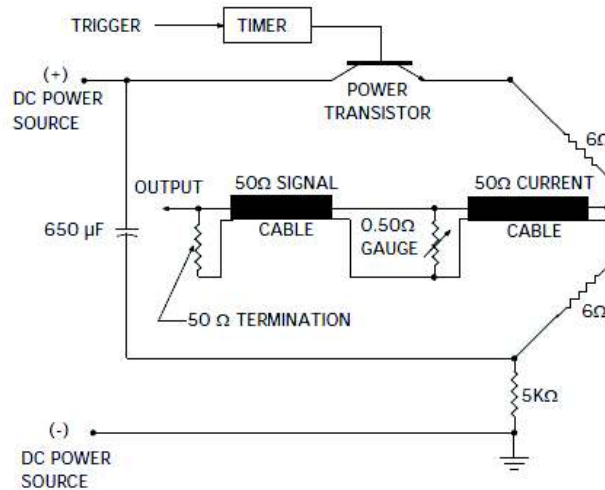
ELECTRICAL SCHEMATICS FOR THE THREE CONFIGURATIONS ON THE CK2-50/0.050-300 POWER SUPPLY



50Ω MODE - SINGLE GAUGE ARRANGEMENT (SANDIA BRIDGE)



50Ω MODE - COMPENSATING GAUGE ARRANGEMENT (DYNASEN BRIDGE)



0.050Ω MODE - LOW IMPEDANCE GAUGE ARRANGEMENT

ANEXO VI.

Lista de precios de sensores Dynasen [26].

Price List # 4, 2017

THINFILM STRESS GAUGES, VELOCITY SENSORS & SWITCHES
Consult our website www.dynasen.com for construction details.

2-1-17

PRICE LIST # 4		UNIT COST (U.S. \$) BASED ON LEAD LENGTH:										NOTES			
MODEL #	ELEMENT SIZE (in. x in.), & ELEMENT THICKNESS (in.) (unless otherwise noted)	LEAD TYPE	LEAD LENGTH L ₀ IN INCHES												
			1 ≤ L	2 ≤ L	3 ≤ L	4 ≤ L	5 ≤ L	6 ≤ L	7 ≤ L	8 ≤ L	9 ≤ L		10 ≤ L	11 ≤ L	
MANGANIN GAUGES - LOW IMPEDANCE (0.005 Ohm), TYPE S (SYMMETRICAL)															
MN10-0.060-FEP/PTFE-S	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	192.35	241.85									** Hot Laminating process. FEP insul. is 0.001 in. thick. PTFE insul. is 0.010 in. thick.	1,3,5,7,8	
MN10-0.060-FEP-S	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	192.35	241.85									** Hot Laminating process. FEP insul. is 0.005 in. thick.	1,3,5,7,8	
MN10-0.060-FEP-MET-S	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	154.85	171.10	187.35	213.70	213.70	213.70	213.70	213.70	213.70	213.70	** Epoxy Laminating process. FEP insul. is 0.001 in. or 0.005 in. thick.	1,3,4,5,7,8	
MN10-0.060-EFEP-S	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	154.85	171.10	187.35	213.70	213.70	213.70	213.70	213.70	213.70	213.70	** Epoxy Laminating process. FEP insul. is 0.001 in. or 0.005 in. thick.	1,3,4,5,7,8	
MN10-0.060-EPTFE-S	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	183.15	230.20	217.25	234.25	250.30	266.35	282.40	298.45	314.50	330.55	** In The Epoxy Laminating Process for the Gauges Above. PTFE insulation is 0.005 in. thick.	1,3,5,7,8	
MANGANIN GAUGES - LOW IMPEDANCE (0.005 Ohm), TYPE AS (ASYMMETRICAL)															
MN10-0.060-FEP/PTFE-AS	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	243.85	293.35									** Hot Laminating process. FEP insul. is 0.001 in. thick. PTFE insul. is 0.010 in. thick.	1,3,5,7,8	
MN10-0.060-FEP-AS	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	243.85	293.35									** Hot Laminating process. FEP insul. is 0.005 in. thick.	1,3,5,7,8	
MN10-0.060-EFEP-AS	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	224.85	249.30	264.15	282.05	302.15	323.15	343.15	363.20	383.25	411.30	** In The Epoxy Laminating Process for the Gauges Above. PTFE insulation is 0.005 in. thick.	1,3,4,5,7,8	
MN10-0.060-EPTFE-AS	(0.18 x 0.78) [0.001]	Cu/Ni	224.85	249.30	264.15	282.05	302.15	323.15	343.15	363.20	383.25	411.30	** In The Epoxy Laminating Process for the Gauges Above. PTFE insulation is 0.010 in. thick.	1,3,5,7,8	
MANGANIN GAUGES - (50 Ohm)															
MN10-50-EX	(0.28 x 0.25) [0.0005]	Cu/Ni	126.30	137.35	159.90	182.10	182.10	182.10	203.70	225.40	225.40	246.90	246.90	Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON. 0.001-inch thick PEP insulation is also available - See note 2 for PEP material.	1,2,3,5,7,8
MN10-50-EX	(0.28 x 0.25) [0.0005]	Cu/Ni	126.30	137.35	159.90	182.10	182.10	182.10	203.70	225.40	225.40	246.90	246.90		1,2,3,5,7,8
MN10-50-EX	(0.18 x 0.18) [0.0004]	Cu/Ni	126.30	137.35	159.90	182.10	182.10	182.10	203.70	225.40	225.40	246.90	246.90		1,2,3,5,7,8
MN10-50-EX	(0.18 x 0.18) [0.0004]	Cu/Ni	126.30	137.35	159.90	182.10	182.10	182.10	203.70	225.40	225.40	246.90	246.90		1,2,3,5,7,8
CONSTANTAN STRAIN GAUGES - (50 Ohm), (UNI-DIRECTIONAL)															
CN10-50-EX-10-UNI	(0.18 x 0.18) [0.0004]	Cu/Cn	134.25	150.30	166.70	200.75	200.75	200.75	224.30	248.30	248.30	267.65	267.65	Standard insulation is 0.001-in. or 0.005-inch thick KAPTON.	1,3,5,7,8
CN10-50-EX-15-UNI	(0.18 x 0.18) [0.0004]	Cu/Cn	134.25	150.30	166.70	200.75	200.75	200.75	224.30	248.30	248.30	267.65	267.65		1,3,5,7,8
CN10-50-EX-25-UNI	(0.28 x 0.25) [0.0004]	Cu/Cn	154.40	168.70	182.35	221.90	221.90	221.90	253.75	285.35	285.35	317.75	317.75		1,3,5,7,8
CONSTANTAN STRAIN GAUGES - (50 Ohm), (BI-DIRECTIONAL)															
BCN10-50-EX-125	(0.128 x 0.128) [0.0004]	Cu/Cn	134.25	150.30	166.70	200.75	200.75	200.75	224.30	248.30	248.30	267.65	267.65	Standard insulation is 0.001-in. or 0.005-inch thick KAPTON.	1,3,5,7,8
BCN10-50-EX-25	(0.28 x 0.28) [0.0004]	Cu/Cn	154.40	168.70	182.35	221.90	221.90	221.90	253.75	285.35	285.35	317.75	317.75		1,3,5,7,8
MANGANIN / CONSTANTAN STRESS / STRAIN GAUGES - (50 Ohm)															
MN/CN10-50-EX	(0.28 x 0.28) [0.0004]	Cu/Ni, Cu/Cn	265.85	287.75	308.10	360.90	360.90							Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON only.	1,3,5,7,8
MN/CN10-50-EX	(0.28 x 0.28) [0.0004]	Cu/Ni, Cu/Cn	265.85	308.10	321.90	414.05	414.05								1,3,5,7,8
PIEZOFILM STRESS GAUGE, (UNI-AXIALLY STRETCHED FILM)															
PVF ₂₁₁ -126-EX	(0.042 x 0.042) [0.0010]	Cu	151.95	162.05	162.05	162.05	240.55	260.55	260.55	305.90	305.90	305.90	305.90	Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON. 0.001-inch thick PEP insulation is also available.	1,2,3,5,6,7,8
PVF ₂₁₁ -126-EX	(0.128 x 0.128) [0.0010]	Cu	151.95	162.05	162.05	162.05	162.05	240.55	260.55	305.90	305.90	305.90	305.90		1,2,3,5,6,7,8
PVF ₂₁₁ -25-EX	(0.250 x 0.250) [0.0010]	Cu	170.40	200.75	200.75	200.75	311.85	311.85	311.85						1,2,3,5,6,7,8
PIEZOFILM STRESS GAUGE, (BI-AXIALLY STRETCHED FILM)															
PVF ₂₁₀ -126-EX	(0.128 x 0.128) [0.0010]	Cu	167.80	211.35	211.35	211.35	267.05	267.05	267.05	333.70	333.70	333.70	333.70	** These three gauges only sold with Constantan Strain Gauges (CN10-50-EX). Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON.	1,2,3,5,6,7,8
PVF ₂₁₀ -25-EX	(0.250 x 0.250) [0.0010]	Cu	186.65												1,2,3,5,6,7,8
ELECTROMAGNETIC VELOCITY GAUGES															
EMV10-10-EX	(0.080 x 0.080) [0.0010]	Cu (50)	106.20	145.80	145.80	145.80	209.20	209.20	209.20	224.05	224.05	224.05	224.05	Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON only.	1,5,7,8
EMV5-5-EX	(0.080 x 0.080) [0.0010]	Cu (50)	114.65	152.90	152.90	152.90	219.80	219.80	219.80	250.00	250.00	250.00	250.00		1,5,7,8
SELF - SHORTING SWITCHES															
SCS10-25-EX	(0.28 x 0.28) [0.0010] Thick Kapton	Cu	106.00	141.35	141.35	141.35	200.25	200.25	200.25	227.20	227.20	227.20	227.20	Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON only.	1,3,5,6,7,8
ADS10-325-EX	(0.28 x 0.28) [0.0010] Thick Kapton, 0.025in. dia. hole	Cu	124.85	148.40	148.40	148.40	213.40	213.40	213.40	250.50	250.50	250.50	250.50		1,3,5,7,8
IONIZATION SWITCHES (OPEN FACE)															
OFADS-5-EX	(0.5 x 0.5) [0.0005]	Cu	Call for Quote											Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON only.	1,5,7,8
PIEZO-ELECTRIC SWITCHES															
PVF ₂₅ -25-EX	(0.28 x 0.28) [0.0010]in. thick PVDF Film	Cu	170.40	200.75	200.75	200.75	311.85	311.85	311.85					Standard insulation is 0.001-in. thick KAPTON only.	1,3,5,7,8

**REGARDING ALL OF DYNASEN'S PRODUCTS: DYNASEN MANUFACTURES CUSTOM SENSORS OF ALL SIZES. IF YOU DO NOT FIND WHAT YOU REQUIRE ON THESE PRICE LISTS PLEASE GIVE US A CALL AND WE WILL WORK WITH YOU TO MEET YOUR SPECIAL NEEDS.

- NOTES - Prices Subject to Change Without Notice -
- Specify gauge model, element size, lead length, bib length and insulation type and thickness. For 50ohm gauges using kapton, 0.5, 2, 3 or 5 mil KAPTON insulation is available at \$7.85 additional per gauge.
 - For 1 mil FEP insulation option, add \$11.95 to basic 50 ohm gauge unit price.
 - Gauges available with 0.0075 inch aluminum shield for EMI/RFI cancellation. Additional \$24.90 per gauge for up to 3 inches. For longer gauges please call for pricing.
 - Standard insulation with 1/16 inch. Add \$8.25 for each inch of width up to a maximum of 5 inches. Typical length of insulation beyond element is equal to 1/2 of the width dimension.
 - Minimum order on all items is a quantity of 10 units. Delivery is quoted on a case-by-case basis. Items are made to order. For Rush delivery an additional fee is required according to the following: To ship an order in 1-week after receipt of order, add 50% to ship in 2-weeks add 30% to ship in 3-weeks add 15%. Dynasen's Sales/Payment terms: Net 30days (upon account approval) with a 2% per day penalty fee applied to total invoice amount for late payments. VISA AND MASTERCARD ACCEPTED ON ALL ORDERS. CALL FOR DETAILS. PHONE# 605-964-4410 OR FAX # 605-967-2824. DYNASEN INC., 30 ARNOLD PLACE, GOLETA, CALIFORNIA 93117, USA. On the Web @ www.dynasen.com, email: info@dynasen.com Shipping is F.O.B. Goleta, CA. (zip 93117), USA. Purchaser can opt to have the shipping costs included in the unit price for items purchased, or Purchaser can provide a valid shipping account number (Fed-Ex, UPS, etc.) where shipping charges can be billed to. International customers must supply a valid shipping account number for Dynasen to bill all shipping to.
 - Custom static calibrations to 50% accuracy included with each gauge.
 - Domestic packaging fee of \$15 applied to all domestic shipments, international packaging fee of \$30 applied to all international shipments.
 - Correl cables can be connected to gauges if needed. Please contact Dynasen for options.

VISA AND MASTERCARD ACCEPTED ON ALL ORDERS. CALL FOR DETAILS. PHONE 605-964-4410 OR FAX # 605-967-2824. DYNASEN INC., 30 ARNOLD PLACE, GOLETA, CALIFORNIA 93117, USA.

ANEXO VII.

Lista de precios de conectores Dynasen [26].

VACUUM FEEDTHROUGH AND CABLE ASSEMBLIES
 Consult our website www.dynasen.com for construction details.

PRICE LIST #3			UNIT COST (U.S. \$) PER QUANTITY OF							NOTES	
MODEL #		DESCRIPTION	1 - 9	10 - 20	21 - 100	101 - 250	251 to 500	501 to 1000	1001 +		
VACUUM FEEDTHROUGHS											
	ONE END TERMINATION	TWO END TERMINATION									
CA-1164	125 MIL MALE CONN	125 MIL MALE CONN	125 MIL VACUUM FEEDTHROUGH WITH HEX NUT AND 1/2" RING	44.75	38.00	32.90	30.00	29.40	29.45	6.7	
CA-1165	125 MIL MALE CONN	125 MIL MALE CONN	125 MIL CABLE CONNECTOR EACH END VACUUM FEEDTHROUGH STAINLESS STEEL FEEDTHROUGH WITH 1/4" 2X THK SAE 170 HEX NUT AND 1/2" RING. 325 PSI PRESSURE TESTED. See TABLE 2	220.50	188.00					6.7	
CA-1164-1	125 MIL MALE CONN	125 MIL MALE CONN	125 MIL VACUUM FEEDTHROUGH	CALL FOR PRICING						6.7	
CABLE ASSEMBLIES											
	ONE END TERMINATION	TWO END TERMINATION									
DYN-1166RNC	80 MIL MALE CONN	RNC	ADAPTOR FOR CONNECTING A 80 MIL PIN CONNECTOR CABLE (CA-1168 SERIES CABLES) TO A COMMON RNC PORT	47.50	38.85	37.80	35.70	29.40	29.45	6.7	
CA-1166-1	RG-174L	RG-174L	RG-174U CABLE WITH POSTAL AT BOTH ENDS	8.55	7.75	7.25	6.80	5.40	5.45	3.5, 6.7	
CA-1166-2	80 MIL CONN	RG-174L	RG-174U CABLE WITH 80 MIL CONNECTOR AT ONE END AND POSTAL AT OTHER END	19.80	15.70	14.85	13.70	13.30	13.70	3.5, 6.7	
CA-1166-3	80 MIL CONN	RNC	RG-174U CABLE WITH 80 MIL CONNECTOR AT ONE END AND MALE RNC AT OTHER END. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	30.80	28.85	28.85	23.40	23.50	23.15	2.3, 6.5, 6.7	
CA-1166-4	80 MIL 90° CONN	RG-174L	RG-174U CABLE WITH 90° ANGLE 80 MIL CONNECTOR AT ONE END AND POSTAL AT OTHER END	37.25	32.10	30.55	27.40	26.50	26.10	3.5, 6.7	
CA-1166-5	80 MIL 90° CONN	RNC	RG-174U CABLE WITH 90° ANGLE 80 MIL CONNECTOR AT ONE END AND MALE RNC AT OTHER END. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	48.90	47.60	39.95	38.40	38.10	37.90	2.3, 6.5, 6.7	
CA-1167-1	125 MIL CONN	125 MIL CONN	RG-174U CABLE WITH 125 MIL CONNECTOR AT BOTH ENDS	25.40	23.80	19.50	18.00	17.50	17.15	3.5, 6.7	
CA-1167-2	125 MIL CONN	RG-174L	RG-174U CABLE WITH 125 MIL CONNECTOR AT ONE END AND POSTAL AT OTHER END	19.80	18.00	15.10	13.40	13.50	13.15	3.5, 6.7	
CA-1167-3	125 MIL CONN	80 MIL CONN	RG-174U CABLE WITH 125 MIL CONNECTOR AT ONE END AND 80 MIL CONNECTOR AT OTHER END	25.40	23.80	19.20	18.00	17.50	17.15	3.5, 6.7	
CA-1167-4	125 MIL CONN	RNC	RG-174U CABLE WITH 125 MIL CONNECTOR AT ONE END AND MALE RNC AT OTHER END. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	30.75	28.90	25.05	24.40	24.20	23.80	2.3, 6.5, 6.7	
CA-1167-5	RNC	RG-174L	RG-174U CABLE WITH MALE RNC CONNECTOR AT ONE END AND POSTAL AT OTHER END. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	27.10	17.15	15.00	13.80	13.10	14.95	14.75	2.3, 6.5, 6.7
CA-1167-6	125 MIL CONN	88 MIL CONN	RG-174U CABLE WITH 125 MIL CONNECTOR AT ONE END AND 88 MIL CONNECTOR AT OTHER END	29.10	23.85	21.40	20.20	19.80	19.40	19.20	3.5, 6.7
CA-1167-7	RNC	RNC	RG-174U CABLE WITH MALE RNC CONNECTOR AT BOTH ENDS. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	29.00	23.85	22.95	23.20	21.80	21.40	21.30	2.3, 6.5, 6.7
DYN-1168RNC	88 MIL MALE CONN	RNC	ADAPTOR FOR CONNECTING A 88 MIL PIN CONNECTOR CABLE (CA-1168 SERIES CABLES) TO A COMMON RNC PORT	47.50	38.85	37.80	35.70	29.40	29.45	6.7	
CA-1168-1	88 MIL CONN	RG-174L	RG-174U CABLE WITH 88 MIL CONNECTOR AT ONE END AND POSTAL AT OTHER END	23.90	19.25	17.90	16.80	16.20	15.85	3.5, 6.7	
CA-1168-2	88 MIL CONN	RNC	RG-174U CABLE WITH 88 MIL CONNECTOR AT ONE END AND MALE RNC CONNECTOR AT OTHER END. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	34.50	29.95	28.90	26.40	25.45	25.05	2.3, 6.5, 6.7	
CA-1168-3	88 MIL 90° CONN	RG-174L	RG-174U CABLE WITH 90° ANGLE 88 MIL CONNECTOR AT ONE END AND POSTAL AT OTHER END	39.30	37.80	39.65	28.80	27.40	27.00	3.5, 6.7	
CA-1168-4	88 MIL 90° CONN	RNC	RG-174U CABLE WITH 90° ANGLE 88 MIL CONNECTOR AT ONE END AND MALE RNC CONNECTOR AT OTHER END. (Male RNC is standard, for optional Female RNC See Table 2)	50.05	42.45	39.10	36.20	37.80	37.40	2.3, 6.5, 6.7	

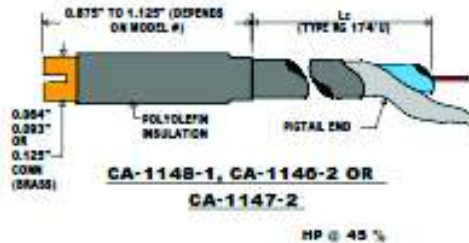
ANEXO VIII.

Tipos de cables Dynasen para conexiones.

DYNASEN INC. FEED THROUGH AND CABLE ASSEMBLIES

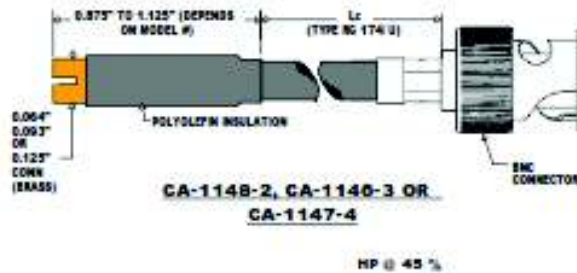
CA-1148-1, CA-1146-2, and CA-1147-2

These cable assemblies comprise 0.064in., 0.093in., or 0.125in. connectors respectively at one end and a pigtail at the other end. Standard lengths are 1 to 6 foot. Other lengths available at an additional cost.



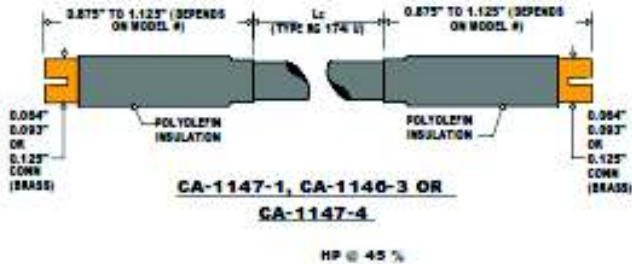
CA-1148-2, CA-1146-3, and CA-1147-4

These cable assemblies comprise 0.064in., 0.093in., or 0.125in. connectors respectively at one end and a BNC at the other end. Standard lengths are 1 to 6 foot. Other lengths available at an additional cost.



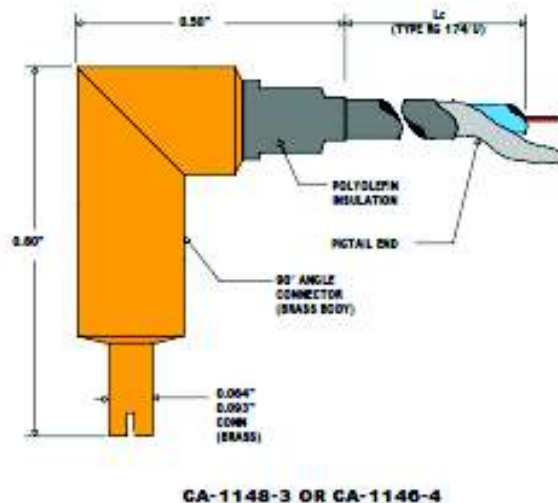
CA-1147-1, CA-1147-3, and CA-1147-6

These cable assemblies comprise either 0.064in., 0.093in., or 0.125in. connectors respectively at one and a 0.125in. connector at the other end. Standard lengths are 1 to 6 foot. Other lengths are available at an additional cost.



CA-1148-3 and CA-1146-4

These cable assemblies are comprised of a 0.064inch or a 0.093inch, 90° connector respectively at one end and a pigtail at the other end. Standard lengths are 1 to 6 foot. Other lengths are available at an additional cost.



ORDEN DE EMPASTADO