

Capítulo 6

SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS

6.1. INTRODUCCIÓN

La automatización y las operaciones de procesos continuos amplían el alcance y el uso de instrumentos de medición tanto en forma individual como en sistemas para el control automático y la medición de variables tales como: presión, nivel, flujo y temperatura, existentes en las instalaciones industriales. El desarrollo de la instrumentación también ha creado la necesidad de efectuar un estudio específico de las mediciones y de los dispositivos empleados para realizarlas, es por ello que el proceso de selección de los transductores es de gran importancia. Cada uno de los medidores existentes en el mercado tienen ventajas y desventajas individuales, pero ninguno incorpora todas las características de los demás. Como consecuencia, todos estos medidores deben ser usados en aplicaciones donde mejor sean adaptados.

Para determinar los requisitos que exige la realización de cualquier medición física se hace indispensable el conocimiento de los principios físicos de la variable a medir, los dispositivos de medición, sus principios de operación y el dominio de aplicación, como paso previo a la selección del transductor que se utilizará en alguna aplicación particular.

La selección del instrumento adecuado es, por consiguiente, el primer paso para la obtención de resultados confiables.

Entre las características más importantes que permiten valorar la calidad de un transductor, por ejemplo, se encuentran:

- Exactitud en la medición de la magnitud de la variable.
- Exactitud sobre un amplio rango de temperatura.
- Exactitud en la reproducción del evento físico en función del tiempo.
- Exactitud en la reproducción de la señal en todo el rango de frecuencia del fenómeno físico.
- Exactitud en la reproducción de la señal de salida aún en ambientes adversos de extrema humedad, temperatura, impactos y vibraciones.
- Robustez y sencillez del diseño, que le permitan ser utilizado por personal sin experiencia.
- Intercambiable.
- Compatibilidad con el acondicionador de señal y preferentemente, integrados ambos en una sola unidad.
- Reducido costo y tamaño.
- Compatibilidad con sistemas normalizados de comunicación digital y analógico.
- Funciones de autodiagnóstico, compensación y detección de fallas internas.
- Bajos requerimientos de potencia eléctrica y poco exigente en la calidad del suministro de energía.

La selección de un instrumento no es una tarea sencilla debido a los múltiples factores que deben ser considerados:

- Existe un gran número de instrumentos similares disponibles en el mercado, con características que ocasionalmente no permiten una objetiva comparación.
- Cada instalación tiene características muy particulares: temperatura, vibraciones, impactos, humedad, corrosión, etc.
- El costo del instrumento, el cual usualmente va asociado a su exactitud y robustez. Debe encontrarse un punto de equilibrio costo-calidad.
- Requerimientos de mantenimiento y confiabilidad.
- La exactitud del instrumento puede estar afectada por variables del proceso correlacionadas con la medición: viscosidad, densidad, presión o temperatura, por ejemplo.
- Debe realizarse en atención al contexto de la instalación donde será utilizado

Adicionalmente, deberá proyectarse un valor estimado confiable de los resultados y la adquisición de cualquier equipo de medición estará sujeto al análisis de su aplicación particular inmediata y futura.

6.2. MATRIZ DE SELECCIÓN

El Instrumentista, después de haber seleccionado los medidores que pueden realizar la misma tarea, debe escoger comparando las características de cada uno de ellos, para que cumpla con las condiciones de operación de la aplicación en particular. Sin embargo, las especificaciones están sujetas a variaciones considerables debido a muchos factores y

relaciones. Luego se debe identificar los requerimientos de medición en base a: exactitud, repetibilidad, costo, confiabilidad, instalación, mantenimiento, visualización requerida. Cada término de la lista tiene varios grados de importancia en la selección, dependiendo de los requisitos de la aplicación, pudiéndosele dar un peso a cada criterio.

La **exactitud** es uno de los primeros factores a ser considerados cuando se selecciona un medidor, debido a que una variable es medida para permitir la automatización y mejorar la calidad del producto final. La exactitud de un instrumento puede depender de los parámetros de operación tales como viscosidad, densidad, conductividad, presión y temperatura; además, puede necesitar calibración inicial, la cual puede ser afectada por las condiciones de operación, para eliminar los efectos de las tolerancias de fabricación.

En aplicaciones como mediciones de calidad de petróleo, la exactitud es muy importante y es la característica básica a ser considerada en la selección del instrumento de medición. Sin embargo, no se debe escoger el instrumento más exacto en cada caso particular, debido a que esto incrementa el costo del mismo y disminuye la selección. Se debe determinar la importancia de la exactitud y el efecto que tendrá en la eficiencia de la planta y la calidad del producto, pero no se debe sobre-especificar.

En muchos procesos la **repetibilidad** de un instrumento es de mayor importancia que su exactitud. Por ejemplo, en un instrumento solo para medición de campo de nivel de un fluido, si el instrumento da una lectura repetitiva estable, el valor de la exactitud de la medición tiene poca importancia.

El **costo** es un factor crítico en la selección de cualquier equipo. Es relativamente fácil comparar costos de adquisición para un caso determinado, pero es difícil hacer comparaciones en forma general. Las variaciones de presión y temperatura, así como los materiales de construcción tienen diferentes efectos significativos.

La **instalación** de un instrumento puede ser costosa, inconveniente y algunas veces imposible. Los requisitos de instalación pueden ser los factores decisivos en la selección de un instrumento, ya que, aunque no existan problemas, los costos de instalación se deben investigar. Después de comparar los costos de los materiales, el siguiente paso es considerar el costo de la instalación en función de la complejidad y requisitos de mano de obra. Cuando la instalación se ha finalizado, el instrumento tiene que ser operado y mantenido bajo un programa de mantenimiento, hacer ajustes debido a cambios en el proceso y chequear la calibración.

Mantenimiento y confiabilidad son otros factores críticos; los cuales varían con el tipo de instrumento y con las variaciones en las condiciones de operación. Para cuantificar los costos de operación y mantenimiento se deben considerar los siguientes factores en relación al propósito de la aplicación: tiempo de trabajo/costo relacionado; valor de los componentes usados; repuestos requeridos a mantener; efectos de mantenimiento a lo largo del tiempo sobre la operación de la planta y eficiencia.

En general, después de seleccionar un medidor apropiado para una aplicación, el mismo debe ser dimensionado y especificado para cumplir con la aplicación deseada, instalado bajo condiciones aceptables y luego, mantenido en óptimas condiciones de funcionamiento a través de un programa de mantenimiento adecuado.

Para completar la selección del instrumento, se debe hacer uso de las normas recomendadas para el tipo de instrumento específico seleccionado.

Transductores de Presión

Los instrumentos de presión se clasifican en: transductores mecánicos y transductores eléctricos y estos a su vez comprenden otros dispositivos como se muestra en la Figura 6.1.

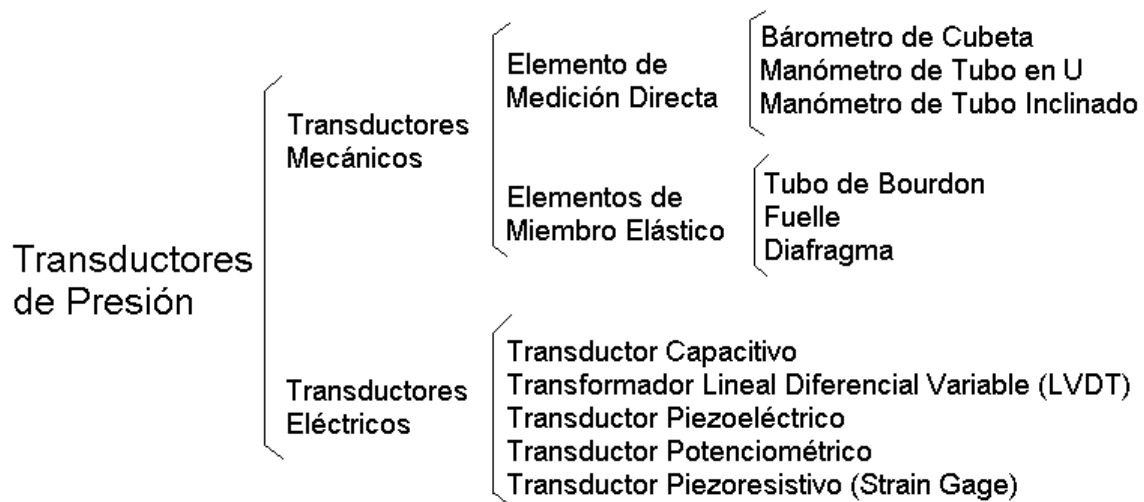


Figura 6.1 Clasificación de los Transductores de Presión.

Los transductores piezoresistivos y los strain gage son los preferidos debido a su gran aplicabilidad. En segundo lugar se considera el tipo capacitivo.

Características de los Transductores de Presión

En la Tabla 6.1 se presentan algunas características de los transductores de presión que ayudaran en la selección de los mismos.

Tabla 6.1 Características de los Transductores de Presión.

Transductor de Presión	Rango de Medición (psi)	Rango de Temperatura (°C)	Nivel de Salida	Excitación	Exactitud (%)
Tubo de Bourdon	0,5 a 100 000	90 (máx)	-----	-----	0,5 - 1
Diafragma	0,071 a 28,466	90 (máx)	-----	-----	0,5 - 1
Fuelle	0,142 a 28,466	90 (máx)	-----	-----	0,5 - 1
Capacitivo	14,696 μ a 14,696	0 a 816	> 100 mV	AC	$\pm 0,05$ - $\pm 0,5$
LVDT	30 a 10 000	-55 a 150	> 100 mV	AC	$\pm 0,05$
Piezoeléctrico	0,1 a 10 000	-240 a 260	< 100 mV	AC(Autogenerada)	± 1
Potenciométrico	5 a 10 000	-54 a 149	> 100 mV	AC y DC	± 1
Strain Gage	0,5 a 10 000	-270 a 371	< 100 mV	AC y DC	$\pm 0,25$

Selección de los Transductores de Presión:

En la selección del instrumento debe existir compatibilidad entre el proceso y el instrumento a elegir. Considerando los valores presentados en la tabla anterior tenemos que:

Según la magnitud de la Presión a Medir:

- Para presiones alta se deben utilizar:
 - Tubo de Bourdon (hasta 100 000 psi).
- Para presiones medias se deben utilizar:
 - LVDT, Piezoeléctrico, Potenciométrico y Strain Gage. (hasta 10 000 psi).
- Para presiones bajas se deben utilizar:
 - Diafragma y fuelle (hasta 28,466 psi).

- Capacitivo (hasta 14,696 psi).

Según la Exactitud:

- Alta se deben utilizar:
 - Capacitivo, LVDT y Strain Gage (0,05 % a 0,25 %)
- Media se deben utilizar:
 - Tubo de Bourdon, Diafragma y Fuelle (0,5 % a 1 %)
- Baja se deben utilizar:
 - Piezoeléctrico y Potenciométrico (1 %).

Al escoger un dispositivo de presión se deben considerar además las siguientes características, para tratar de acoplarlo a las exigencias requeridas por el proceso en estudio:

- Ambiente de operación.
- Sobrepresión.
- Rango de temperatura.
- Susceptibilidad a golpes y vibraciones.

Transductores de Nivel

Los métodos de medición de nivel de líquido comprenden los métodos de medición directa y los métodos de medición indirecta y estos a su vez comprenden otros dispositivos como se muestra en la Figura 6.2.

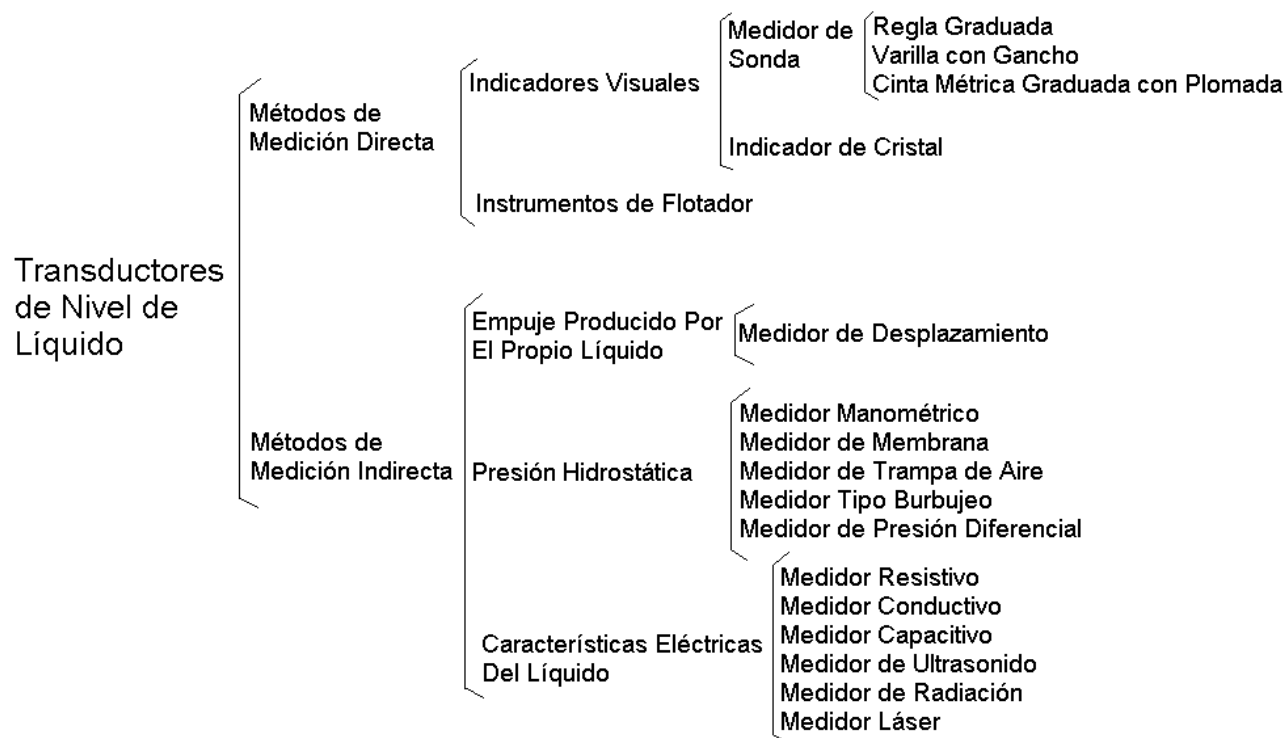


Figura 6.2 Clasificación de los Transductores de Nivel.

Los transductores de nivel que son generalmente elegidos para diferentes aplicaciones son los medidores de desplazamiento y de presión hidrostática debido a su simplicidad y confiabilidad. Otras técnicas disponibles como la capacitiva y el ultrasonido, están siendo usadas como una segunda selección si las primeras opciones presentan problemas debido a que los principios de medición de estos ofrecen la posibilidad de autochequeo a todo el instrumento. Esta posibilidad es particularmente importante para incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas de protección.

Características de los Transductores de Nivel

En la Tabla 6.2 se presentan algunas características de los transductores de nivel de líquidos que ayudaran en la selección de los mismos.

Tabla 6.2 Características de los Transductores de Nivel.

Transductor de Nivel	Rango de Medición (m)	Temperatura Máxima del Líquido (°C)	Presión Máxima del Líquido (psi)	Exactitud (%FE)	Aplicaciones
Regla Graduada	Limitado por la longitud del dispositivo	60	14,696	±0,5 mm/FE	Tanques Abiertos Medición de Aceite y Gasolina. Procesos Granulosos
Varilla con Gancho	Limitado por la longitud del dispositivo	60	14,696	±0,5 mm/FE	Tanques Abiertos Medición de Aceite y Gasolina. Procesos Granulosos
Cinta Métrica Metálica con Plomada	Limitado por la longitud del dispositivo	60	14,696	±0,5 mm/FE	Tanques Abiertos Medición de Aceite y Gasolina. Procesos Granulosos
Indicador de Cristal	1,78 (Baja Presión) 2,5 (Alta Presión)	200	> 101,5	±0,5 mm/FE	Lecturas Periódicas en Tanques Abiertos y Cerrados
Instrumentos de Flotador	0 - 10	530	5000	±6,349mm/FE	Tanques Abiertos y Cerrados, Presurizados o al Vacío
Medidor de Desplazamiento	0 - 39,37	540	5000	±6,349mm/FE	Tanques Abiertos y Cerrados, Presurizados o al Vacío. Control, Alarmas y Medición de Interfaz Líquido a Líquido
Manométrico	Limitado por la altura del Tanque	60	14,696	±1	Tanques Abiertos y Cerrados a presión Atmosférica
Caja de Diafragma	Limitado por la altura del Tanque	60	14,696	±1	Tanques Abiertos
Burbujeo	Limitado por la altura del Tanque	200	5693	±1	Tanques Abiertos. Líquidos Corrosivos o con sólidos en suspensión

Presión Diferencial	Limitado por los intervalos del manómetro diferencial	200	2135	$\pm 0,5$	Medición de nivel de Interfaces Indicación Registro y Control
Capacitivo	Amplio	400	3560	± 1	Medición de Interfaz Alarmas Control
Ultrasonido	0,152 - 30,48	200	5700	$\pm 1 - \pm 3$	Mediciones Continuas y Alarmas

Selección de los Transductores de Nivel

El medidor de nivel seleccionado depende de las necesidades o condiciones de operación del sistema.

Considerando los valores presentados en la Tabla 2 tenemos que:

Según las Características del Tanque:

- Tanques Abiertos se deben utilizar:
 - Se pueden utilizar todos los dispositivos mencionados.
- Tanques no Presurizados se deben utilizar:
 - Indicador de Cristal, Medidor de Ultrasonido, Medidor de Desplazamiento, Instrumentos de flotador, Manométrico y Capacitivo .
- Tanques Presurizados se deben utilizar:
 - Indicador de Cristal, Capacitivo, Medidor de Ultrasonido, Medidor de Desplazamiento, Instrumentos de flotador

Según la Exactitud:

- Alta se deben utilizar:
 - Medidor de Sonda, Medidor de Presión Diferencial, Indicador de Cristal

(0,5%)

- Media se deben utilizar:

- Manométrico, Caja de Diafragma, Burbujeo, Capacitivo y Ultrasonido (1

%)

- Baja se deben utilizar:

- Instrumentos de Flotador y Medidor de desplazamiento (6,349%).

En la selección de un medidor de nivel de líquidos se requiere básicamente:

- Altura del tanque.
- Rango de nivel: máximo, normal, mínimo.
- Características del fluido.

Transductores de Flujo

Entere los métodos de medición de flujo de fluidos para sistemas de tubería cerrada se encuentran los que se muestran en la Figura 6.3, y estos a su vez comprenden otros dispositivos.

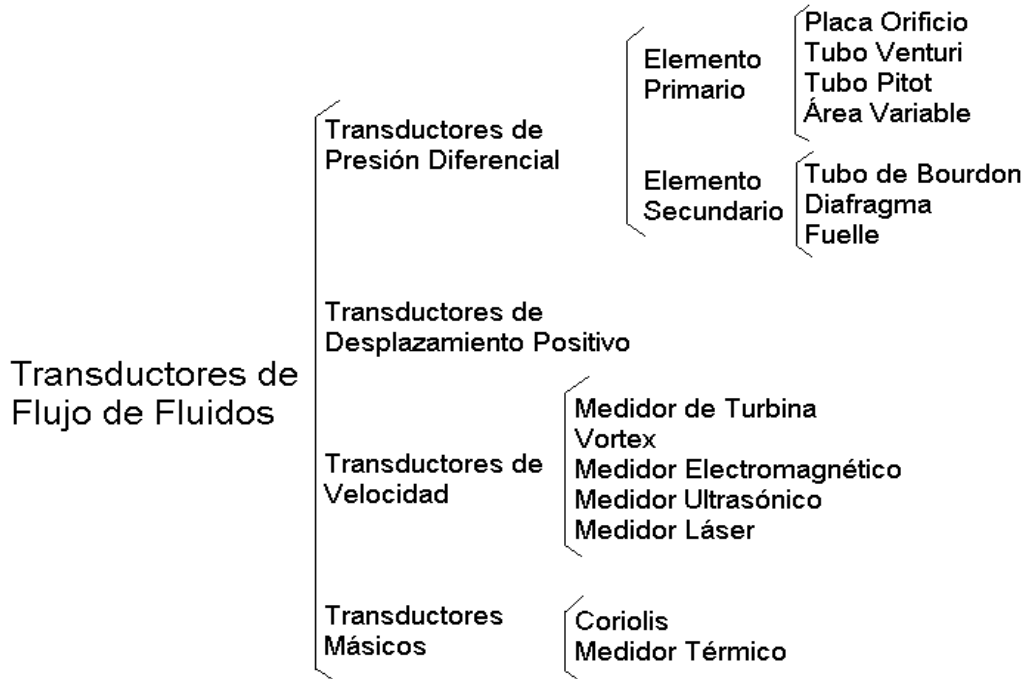


Figura 6.3 Clasificación de los Transductores de Flujo.

Características de los Transductores de Flujo

En la Tabla 6.3 se presentan algunas características de los transductores de flujo que ayudaran en la selección de los mismos.

Tabla 6.3 Características de los Transductores de Flujo.

Transductor de Flujo	Costo Relativo	Temperatura Máxima del Fluido (°C)	Presión Máxima del Fluido (psi)	Exactitud	Aplicaciones
Placa Orificio	Bajo	Ninguna	Limitada por el transductor de presión	±2 - ±4 (%FE)	Fluidos limpios y sucios.
Area Variable	Bajo	350	300	±1 - ±10 (%FE)	Fluidos con densidad y viscosidad variables
Desplazamiento positivo	Medio	-25 - 82	1500	±0,5 (% de la Velocidad del Fluido)	Fluidos limpios y con alta viscosidad
Turbina	Alto	-240 - 538	7500	±0,25 (% de la Velocidad del Fluido)	Fluidos limpios y viscosos
Vortex	Alto	-40 - 400	-----	±1 (% de la Velocidad del Fluido)	Fluidos limpios
Electromagnético	Alto	-----	-----	±0,5 (% de la Velocidad del Fluido)	Líquidos Claros, sucios, viscosos y conductivos.

Selección de los Transductores de Flujo

Utilizando las características del fluido a ser medido (claridad, conductividad y viscosidad) es posible descartar rápidamente algunos medidores y disminuir la cantidad de estos que pueden realizar la misma tarea. En la Figura 6.4 se presenta un Diagrama de Flujo, basado en las características del fluido, que puede ser usado para una selección rápida.

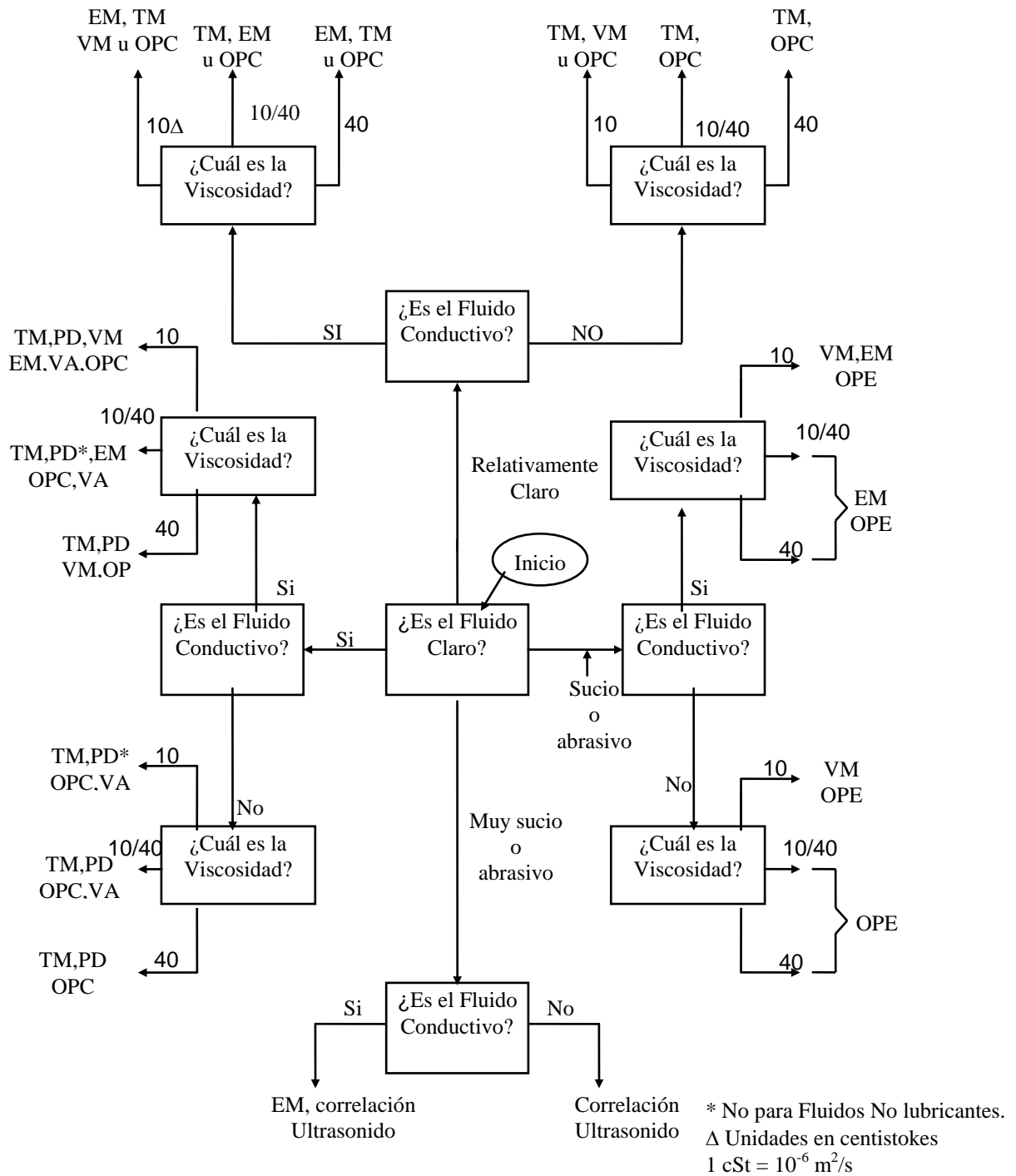


Figura 6.4 Selección de medidores de flujo¹.

¹ Selección de medidores de flujo en base a claridad, conductividad y viscosidad del fluido. Las abreviaturas usadas son EM = electromagnético; TM = medidor de turbina; VM = medidor vortex; PD = desplazamiento positivo; VA = área variable; OPE = placa orificio excéntrico y OPC = placa orificio concéntrico.

Transductores de Temperatura

Los métodos de medición de temperatura se muestran en la Figura 6.5.

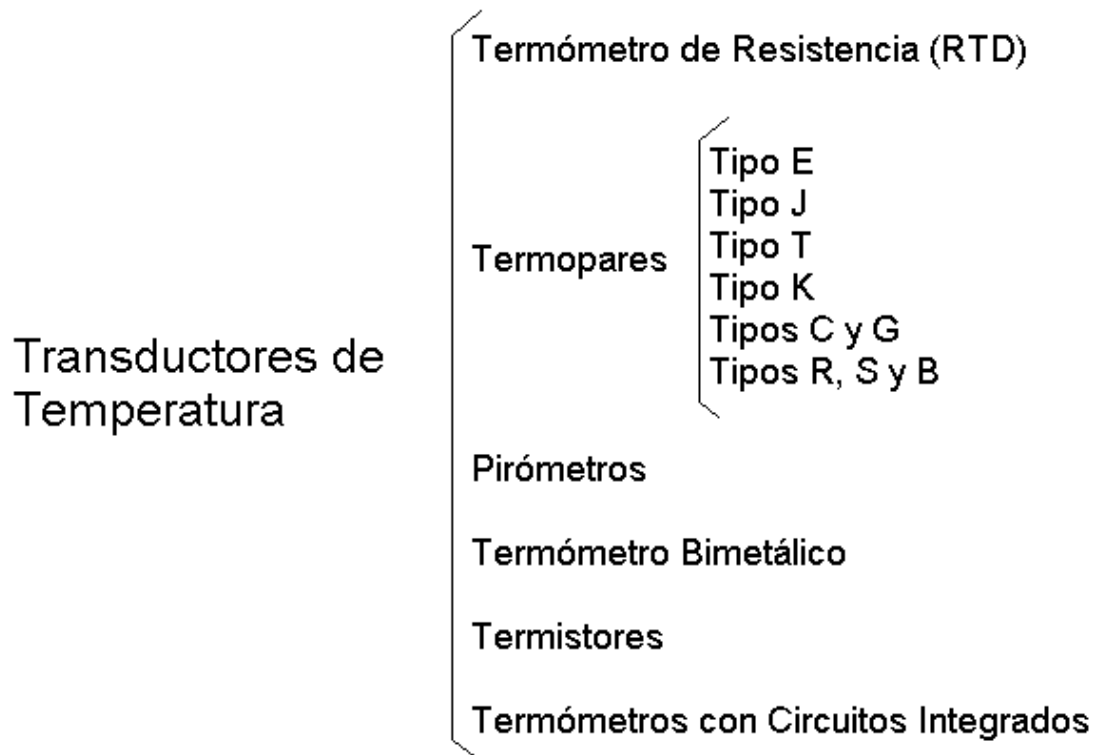


Figura 6.5 Clasificación de los Transductores de Temperatura.

Características de los Transductores de Temperatura

En la Tabla 6.4 se presentan algunas características de los transductores de temperatura que ayudaran en la selección de los mismos.

Tabla 6.4 Características de los Transductores de Temperatura.

Transductor De Temperatura	Rango De Medición (°C)	Exactitud (% fe)	Aplicaciones
RTD de Platino	-200 - 950	0,01	Temperaturas de fluidos y superficie
RTD de Niquel	-150 - 300	0,5	Temperaturas de fluidos y superficie
RTD de Cobre	-200 - 120	0,1	Temperaturas de fluidos y superficie
Termopar Tipo T	-200 - 260	0,4 - 2	Biofísica, Temperatura interna de Maquinas de Combustión Instrumentos Científicos y Calorimetría Investigaciones Médicas y Petroquímicas.
Termopar Tipo J	550 - 750	0,3 - 0,5	Biofísica, Temperatura interna de Maquinas de Combustión Instrumentos Científicos y Calorimetría Investigaciones Médicas y Petroquímicas.
Termopar Tipo K	hasta 1100	0,8	Biofísica, Temperatura interna de Maquinas de Combustión Instrumentos Científicos y Calorimetría Investigaciones Médicas y Petroquímicas.
Termopar Tipo R y S	hasta 1500	0,5 - 0,8	Biofísica, Temperatura interna de Maquinas de Combustión Instrumentos Científicos y Calorimetría Investigaciones Médicas y Petroquímicas.
Pirómetro	-50 - 4600	±0,5	Medición de altas temperaturas Cuerpos en movimiento.
Termómetro Bimetálico	-73 - 538	±0,5 - ±1	Control Interruptores por sobrecarga Compensación de temperatura
Termistores	-100 - 450	±0,005 - ±0,1	Compensación de temperatura Industria en general
Termómetros de CI	-55 - 150	±0,5	Control Compensación de unión de referencia en Termopares

Selección de los Transductores de Temperatura:

Considerando los valores presentados en la Tabla 4 se tiene que:

Según la Magnitud de la Temperatura a medir:

- Altas Temperatura:
 - Pirómetros (hasta 4600°C).
- Temperaturas Medias:
 - Termopares (1500°C) y RTD (950°C).

- Bajas Temperatura:
 - Termómetro Bimetálico (538°C), Termistores (450°C) y Termómetros con CI (150°C)

Según la Exactitud:

- Alta:
 - Termistores (0,005% a 0,1%), RTD (0,01% a 0,5%)
- Media:
 - Pirómetros (0,5%), Termómetro Bimetálico (0,5% a 1%), Termómetros con CI (0,5%), Termopares a excepción del Tipo T (0,3% a 0,8%)
- Baja:
 - Termopar Tipo T (0,4% a 2%).

Al seleccionar los transductores de temperatura se debe tener en cuenta su velocidad de respuesta. Los elementos primarios eléctricos, termistores, termopares y pirómetros de radiación se caracterizan porque el tiempo de respuesta depende únicamente del intercambio térmico entre el fluido y el elemento, ya que la corriente eléctrica circula por los cables de conexión a la velocidad de la luz, directamente al receptor.

Los termistores son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta varía de fracciones de segundo a minutos, de acuerdo con su capacidad térmica dada por el tamaño y forma del elemento sensible.

En el termopar, dos hilos soldados en un extremo constituyen la masa a calentar, hilo torcido o soldado a tope.

El pirómetro de radiación responde rápidamente a los cambios en la temperatura por dos razones principales: la captación de energía radiante es prácticamente instantánea y la masa de la termopila es muy pequeña.

Los elementos de temperatura están normalmente inmersos en vainas termométricas o en tubos de protección para tener así una protección mecánica o bien estar aislados del fluido cuya temperatura miden, por lo tanto, su velocidad de respuesta es menor. Siempre que ello sea posible, se recomienda prescindir de las vainas o tubos de protección para eliminar el retardo considerable que presentan a la transmisión de la temperatura.

Otro factor que influye en la respuesta es la clase de fluido que rodea al elemento y la velocidad de circulación, cuanto mayor sea esta última tanto mayor será el suministro de calor del fluido al elemento de temperatura.

La profundidad de inmersión tiene también su importancia. Si es insuficiente no permite una respuesta suficientemente rápida y existe el riesgo de un error dinámico importante. El error dinámico es inherente a toda medida, ya que siempre se transfiere energía entre el fluido y el elemento y esta transferencia requiere necesariamente un cierto tiempo para efectuarse.

6.3. MÉTODO DE DECISIÓN DE SELECCIÓN BINARIA

En el proceso de procura, el objetivo del comprador es encontrar la oferta que mas se adapte a sus necesidades al mas bajo costo. En busca de este objetivo, el comprador realiza una licitación, donde todos los vendedores presentan sus ofertas considerando las especificaciones dadas por el comprador, las cuales deben ser completas, exactas, sin ambigüedades y donde se incluyan las reglas de evaluación.

El vendedor al realizar su oferta, busca ser seleccionado (menor costo) y para ello debe estar claro con las necesidades del comprador y las prioridades (pesos) dadas a las características (atributos) de los dispositivos o sistemas.

En conclusión, el método de selección de un dispositivo o sistema, debe ser el componente más importante en el proceso de procura.

El método tradicional de realizar una Matriz de Selección, donde aparecen los diferentes fabricantes junto con las características de sus productos, queda dependiendo del personal que realice la selección (subjetiva) y por lo tanto puede variar.

Para evitar este problema, con el Método de Decisión de Selección Binaria (MDSB) se hace una evaluación objetiva. El MDSB, permite evaluar los atributos cuantitativos y cualitativos de un dispositivo o sistema, estableciendo prioridades entre ellos.

Este método se aplicara a la selección de instrumentos para su ilustración, pero su gran utilidad es en la selección de sistemas tales como telecomunicaciones, SCADA, DCS, PLC, Analizadores, UPS donde los proveedores son pocos y el numero de atributos a evaluar sea considerable.

Para la aplicación del método se siguen los siguientes pasos:

- **Seleccionar los parámetros relevantes.**

Como primer paso, es necesario establecer el conjunto de características fundamentales, es decir, características que descartarían al equipo examinado de no ser satisfechas por éste. Por ejemplo, en el caso de seleccionar un instrumento de medición portátil, quedarían descartados los instrumentos que requieran exclusivamente alimentación de tensión alterna de 120 V.

- **Seleccionar los parámetros de análisis**

El objetivo consiste en establecer el conjunto de características de los equipos que se consideran conveniente estudiar, descartando aquellas que no son importantes para el análisis. Por ejemplo, en un multímetro puede no ser importante la capacidad de medición de frecuencia o temperatura, si lo que se desea es un instrumento para medir tensión, corriente y resistencia.

- **Construir la matriz de atributos**

El objetivo de la matriz de atributos es establecer la importancia ponderada de los atributos o parámetros de estudio. Para la construcción de la misma, se colocan todos los parámetros en estudio en arreglo de fila y columna de referencia (Tabla 6.5). Luego, cada uno de los atributos se compara con los demás: A_i con A_k . Si la característica A_i es más importante que A_k se coloca en la intersección del arreglo un “uno”, de lo contrario se coloca un cero. En la columna “Valor” se coloca la sumatoria de la fila correspondiente a cada atributo. En la columna “Peso” se coloca P_i , el valor ponderado respecto a la suma de la columna “Valor”.

Tabla 6.5 Matriz de atributos

	A_1	A_2	A_3	A_4	valor	peso
A_1	0	1	0	1	$\Sigma_1 = 2$	$P_1 = 2/6$
A_2	0	0	1	0	$\Sigma_2 = 1$	$P_2 = 1/6$
A_3	1	0	0	0	$\Sigma_3 = 1$	$P_3 = 1/6$
A_4	0	1	1	0	$\Sigma_4 = 2$	$P_4 = 2/6$
					suma = 6	6/6

Donde :

A_1 es mas importante que A_2 y A_4 y es menos importante que A_3

A_2 es mas importante que A_3 y es menos importante que A_4

A_4 es mas importante que A_3

El peso del atributo A_1 es $P_1 = 2/6$

El peso del atributo A_2 es $P_2 = 1/6$

El peso del atributo A_3 es $P_3 = 1/6$

El peso del atributo A_4 es $P_4 = 2/6$

De esta forma, quedan establecidos los pesos de importancia para cada uno de los atributos en estudio para la selección

- **Construir la Matriz de Coeficientes de Énfasis**

La matriz de coeficientes de énfasis, se usa para hacer la comparación entre los equipos para cada uno de los atributos; el objetivo es establecer la ponderación de cada instrumento respecto a los otros para cada atributo.

Para la construcción de la matriz se colocan todos los instrumentos o equipos en estudio en la fila y columna de referencia (Tabla 6.6), luego cada uno los instrumentos se compara con los demás. I_i con I_k . Si I_i es mayor o mejor que I_k se coloca uno en la intersección, de lo contrario se coloca un cero. En la columna valor se coloca la sumatoria de la fila correspondiente a cada instrumento; en la columna peso " W_i " se coloca valor normalizado respecto a la suma de la columna valor.

Tabla 6.6 Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A_1

	I_1	I_2	I_3	I_4	valor	peso
I_1	0	1	1	1	$\Sigma_1=3$	$W_{11} = 3/6$
I_2	0	0	1	1	$\Sigma_2=2$	$W_{21} = 2/6$
I_3	0	0	0	1	$\Sigma_3=1$	$W_{31} = 1/6$
I_4	0	0	0	0	$\Sigma_4=0$	$W_{41} = 0/6$
					suma = 6	6/6

Donde :

El atributo A_1 en el equipo I_1 es mejor que en el equipo I_2, I_3, I_4

El énfasis del instrumento I_1 para el atributo A_1 : W_{11} es $3/6$

El énfasis del instrumento I_2 para el atributo A_1 : W_{21} es $2/6$

El énfasis del instrumento I_3 para el atributo A_1 : W_{31} es $1/6$

El énfasis del instrumento I_4 para el atributo A_1 : W_{41} es 0

Cada coeficiente W_{iR} está definido como:

W_{iR} : i = instrumento y R = atributo.

De esta forma, se establecen los pesos de importancia para cada uno de los instrumentos en estudio. Es necesario construir tantas matrices de coeficientes de énfasis como atributos se analizan.

- **Construir la Matriz de Decisión**

Por último, se realiza la matriz de decisión (Figura 6.6) en donde se agrupan los pesos de importancia para cada uno de los atributos y el coeficiente de énfasis para cada uno de los instrumentos.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}$$

Figura 6.6 Matriz de Decisión

Resolviendo el producto de matrices, se encuentra la matriz solución (Figura 6.7)

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/6 & W_{12} & W_{13} & W_{14} \\ 2/6 & W_{22} & W_{23} & W_{24} \\ 1/6 & W_{32} & W_{33} & W_{34} \\ 0/6 & W_{42} & W_{43} & W_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2/6 \\ 1/6 \\ 1/6 \\ 2/6 \end{bmatrix}$$

Figura 6.7 Matriz solución

- **Conclusión**

El instrumento I_k que tenga el mayor valor de S_k será el mejor instrumento ponderado de acuerdo a la importancia establecida para cada uno de los parámetros o atributos del equipo.

- **Ejemplo de aplicación**

Se desea seleccionar un transductor de presión escogiendo entre las alternativas señaladas en la tabla de opciones siguiente:

Transductor de presión	Exactitud (\pm % fe)	Temperatura del medio ($^{\circ}$ F)	Repetibilidad (\pm % fe)	Rango de medida (psi)
TP 1	0.5	-22 a 212	0.05	0 a 200
TP 2	0.25	-22 a 212	0.05	0 a 300
TP 3	0.25	14 a 175	0.05	0 a 150
TP 4	1	32 a 160	0.25	-14 a 500

La selección deberá establecerse de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Rango de medida: (0 a100) psi
- Exactitud: Mejor que 1.5 % fe
- Repetibilidad: Mejor que 1 % fe
- Temperatura del medio: (60 a100) $^{\circ}$ F

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, se procede según los siguientes pasos:

- Se asignan las variables de identificación de cada atributo:

A1: Exactitud

A2: Temperatura del medio

A3: Repetibilidad

A4: Rango de medida

- Asignar la importancia ponderada entre atributos:

A1 es más importante que A2 , A3 y A4

A2 es más importante que A4

A3 es más importante que A2

A4 es más importante que A3

- Se obtiene la matriz de atributos:

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	valor	peso
A ₁	0	1	1	1	$\Sigma_1 = 3$	$P_1 = 3/6$
A ₂	0	0	0	1	$\Sigma_2 = 1$	$P_2 = 1/6$
A ₃	0	1	0	0	$\Sigma_3 = 1$	$P_3 = 1/6$
A ₄	0	0	1	0	$\Sigma_4 = 1$	$P_4 = 1/6$
suma = 6					6/6	

- Se construye la matriz de coeficientes de énfasis para cada Atributo, a partir de las características y rangos de cada instrumento:

Para Atributo A1

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	valor	peso
I ₁	0	0	0	1	$\Sigma_1 = 1$	$W_{11} = 1/5$
I ₂	1	0	0	1	$\Sigma_2 = 2$	$W_{21} = 2/5$
I ₃	1	0	0	1	$\Sigma_3 = 2$	$W_{31} = 2/5$
I ₄	0	0	0	0	$\Sigma_4 = 0$	$W_{41} = 0/5$
suma = 5					5/5	

Para Atributo A2

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	valor	peso
I ₁	0	0	1	1	Σ ₁ = 2	W ₁₂ = 2/5
I ₂	0	0	1	1	Σ ₂ = 2	W ₂₂ = 2/5
I ₃	0	0	0	1	Σ ₃ = 1	W ₃₂ = 1/5
I ₄	0	0	0	0	Σ ₄ = 0	W ₄₂ = 0/5
					suma = 5	5/5

Para Atributo A3

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	valor	peso
I ₁	0	0	0	1	Σ ₁ = 1	W ₁₃ = 1/3
I ₂	0	0	0	1	Σ ₂ = 1	W ₂₃ = 1/3
I ₃	0	0	0	1	Σ ₃ = 1	W ₃₃ = 1/3
I ₄	0	0	0	0	Σ ₄ = 0	W ₄₃ = 0/3
					suma = 3	3/3

Para Atributo A4

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	valor	peso
I ₁	0	1	0	1	Σ ₁ = 2	W ₁₄ = 2/6
I ₂	0	0	0	1	Σ ₂ = 1	W ₂₄ = 1/6
I ₃	1	1	0	1	Σ ₃ = 3	W ₃₄ = 3/6
I ₄	0	0	0	0	Σ ₄ = 0	W ₄₄ = 0/6
					suma = 6	6/6

- Se construye ahora la Matriz de Decisión

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/5 & 2/5 & 1/3 & 2/6 \\ 2/5 & 2/5 & 1/3 & 1/6 \\ 2/5 & 1/5 & 1/3 & 3/6 \\ 0/5 & 0/5 & 0/3 & 0/6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3/6 \\ 1/6 \\ 1/6 \\ 1/6 \end{bmatrix}$$

- Resolviendo el conjunto de ecuaciones se obtiene:

$$S_1 = 0,278$$

$$S_2 = 0,35$$

$$S_3 = 0,372$$

$$S_4 = 0,0$$

Por tanto, la mejor elección, el mejor instrumento ponderado es el I3, el TP3: transductor de presión 3.