

# Diseño e instrumentación de una línea de aire comprimido para un laboratorio académico

Design and instrumentation of a compressed air pipeline for an academic lab

Gustavo Nieto Vergara<sup>1</sup>, Kevis Manjarres Sierra<sup>1</sup>, Jesus Galvis Villero<sup>1</sup>, Manuel Rios Bertel<sup>1</sup>, Javier Roldan Mckinley<sup>1,2</sup>, Jovanny Duque<sup>3</sup>

<sup>1</sup>: Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia

<sup>2</sup>: Grupo DIMER, Universidad del Atlántico

<sup>3</sup>: Grupo GIIT, ITSA

gustavo\_nieto89@hotmail.com

k-mansi10@hotmail.com

jesusgalvis125@hotmail.com

manuel.manuelrios@gmail.com

javierroldan@mail.uniatlantico.edu.co

jduque@itsa.edu.co

**Resumen**— Se presentan los pasos a seguir para el diseño de una línea de suministro de aire comprimido para un laboratorio de enseñanza. La normativa aplicada permite la evaluación del tipo de riesgo y su respectiva cuantificación del nivel, asociada al riesgo de sordera profesional por el ruido producido por el compresor. Mediante una matriz de evaluación se consideraron cuatro alternativas de diseño, teniendo en cuenta sugerencias de potenciales usuarios y proveedores del servicio de instalación. Se construyó un DAQ para el monitoreo de la presión en la línea con un transductor piezoeléctrico y un microcontrolador Arduino. La curva del sensor obtenida permite el uso del sistema en futuros proyectos académicos.

**Palabras clave**—DAQ, línea de aire, monitoreo de presión, neumática.

**Abstract**— Followed steps in the design of an air supply pipeline for a didactic laboratory are presented. Regulations allow estimating the risk type and its quantification, as a consequence of professional deafness due to the compressor unit. Evaluation of four pipeline designs was made using an evaluation matrix, where users and suppliers suggestions were taken into account. A DAQ that integrates a piezoelectric transducer and an Arduino microrcontroller was implemented for monitoring the pressure. The obtained sensor equation (95% reliability) is to be useful for future academic projects in which the pneumatic system is used.

**Key Word** —DAQ, air pipeline, pressure monitoring, pneumatics.

## I. INTRODUCCIÓN

La neumática ocupa un destacado lugar en la industria moderna por su sencillez de aplicación y reducido costo de instalación en comparación con las aplicaciones hidráulicas, logrando con ella casi cualquier nivel de automatización [1].

Los sistemas neumáticos transmiten potencia con aire, un fluido abundante, económico, fácilmente transformable, almacenable, no contaminante y no inflamable al cambio de temperatura [2], y que se complementan con componentes eléctricos y electrónicos para alcanzar elevados niveles de automatización y flexibilidad, solucionando un gran número de problemas en la industria [3]. Así mismo, según lo establecido por ACIEM, dentro de las competencias y habilidades que debe manejar un ingeniero mecánico está el dominio de la Automatización Neumática e Hidráulica [4]. Es necesario que el ingeniero mecánico egrese con conocimiento teórico y práctico de [2,3]: compresores, redes de aire, tanques de almacenamiento, limpieza y adecuación del aire, válvulas, sensores, circuitos neumáticos básicos, etc.

Este artículo presenta las generalidades del diseño de una línea de aire comprimido para un laboratorio de Robótica, teniendo en cuenta toda la normativa de salud ocupacional y seguridad industrial, tratando de evitar posibles enfermedades profesionales para los usuarios [5]. Se implementa una línea para alimentar equipos de laboratorio: bancos neumáticos, torno CNC y fresadora CNC. El monitoreo de la presión se realiza con un sistema de adquisición de datos embebido de bajo costo, que evita que el docente deba abandonar el espacio de trabajo para tener acceso a la lectura. Mediante este proyecto se ofrecen las condiciones para la adquisición de conocimientos de sistemas neumáticos, al tiempo que se mejora el ambiente e infraestructura de enseñanza.

## II. METODOLOGÍA

El trabajo presentado requirió de la compilación de normas vigentes y formulación para el diseño de líneas de aire

comprimido y selección de componentes, que son utilizadas para dimensionar el sistema por lo cual tiene el enfoque cuantitativo [6]; con el componente cualitativo presente en la información recibida del personal asesor que permitió establecer y ponderar criterios de evaluación de alternativas para una posterior calificación y selección de la opción más adecuada. En cuanto al método de investigación, predomina el tipo experimental dada la fase alcanzada de implementación del sistema [7].

### III. GENERALIDADES DEL SISTEMA NEUMÁTICO

La normativa de mayor relevancia para los sistemas neumáticos es la ISO 4414 [8], que especifica las reglas y requisitos generales de seguridad aplicables al diseño, construcción y modificación de los sistemas neumáticos y sus componentes; se debe considerar el objetivo operacional para el cual este es fabricado, teniendo en cuenta la valoración preliminar de los riesgos cuando se utilice el sistema según lo previsto (art. 5.1, ISO 4414). Los riesgos identificados previamente se eliminan por medio del diseño, y en caso de que no sea posible se debe advertir sobre tales. El aumento de la presión puede afectar la seguridad de todos los componentes relacionados con el sistema neumático, y estos deberán ser diseñados/seleccionados para soportar potenciales presiones superiores a la presión máxima del sistema, o superiores a la presión nominal de los componentes, para evitar accidentes, art 5.2.2, ISO 4414. Las pérdidas de presión comprometen la integridad del sistema y sus activos, más no al ser humano, y en caso que exista una fuga de aire no deberá ser peligrosa.

El nivel de ruido es un aspecto muy importante a considerar dentro de la seguridad, lamentablemente en la ISO 4414 el ruido no es tratado a profundidad, pero se ha adoptado la normativa OSHA [9] en lo concerniente al ruido. Este aspecto no es considerado con profundidad en el presente trabajo, pero el nivel de ruido debería estar por debajo de 90dB para máximo cuatro horas al día de exposición, de acuerdo con la norma OSHA 1919.95 [10], norma adoptada oficialmente en Colombia a través del decreto 2566 de 2009 donde se encuentra la sordera como enfermedad profesional [11].

Los requisitos operacionales y funcionales de un sistema de aire comprimido se establecen en el art. 5.2.6-ISO 4414; se resaltan el rango de la presión de trabajo, la temperatura de funcionamiento del sistema, los ciclos de trabajo y la cantidad de flujo. En cuanto a la calidad del aire, la norma ISO 8573-1: 2010 [12] determina seis calidades de aire comprimido, para este caso sería calidad 4, Tabla 1, no determinado con mediciones especializadas, sino asignado teniendo en cuenta las condiciones de limpieza del laboratorio.

La compañía INGERSOLL RAND brinda una clasificación de los diferentes sectores industriales con su respectiva descripción de la clase de aire para utilizar [13]. Para este caso se asigna la clase del aire como IG4, con base en las

herramientas del laboratorio que se accionarían con el fluido, y teniendo en cuenta el manejo de herramientas neumáticas e instrumentación en el laboratorio.

El art. 5.3.1, ISO 4414, sugiere listar las condiciones más relevantes: rango de la temperatura ambiente, rango de la humedad relativa, presión atmosférica, disponibilidad de servicios públicos, especificaciones de la red eléctrica (voltaje, frecuencia, amperaje), fuentes de contaminación, fuentes de vibración, factores limitantes, por ejemplo como legales o medioambiente entre otros, y espacio necesario para el acceso, uso y mantenimiento de los componentes. No hubo para este proyecto, mayores limitantes en cuanto a tales condiciones.

Calidad	Sólidos			Agua	Aceite/ vapor de aceite
	Número máximo de partículas/m <sup>3</sup>			Punto de condensación [°C]	[mg/m <sup>3</sup> ]
	0,1-0,5 [micras]	0,5-1 [micras]	1,0-5 [micras]		
0	Según especificaciones, más estricta que la clase 1				
1	100	1	0	-70	0.01
2	100000	1000	10	-40	0.1
3	ND	10000	500	-20	1
4	ND	ND	1000	3	5
5	ND	ND	20000	7	ND
6	ND	ND	ND	10	ND

ND: No disponible

Tabla 1. Calidad de aire comprimido ISO 8573-1: 2010 [12].

### IV. DISEÑO DE LA RED NEUMÁTICA

#### A. Requerimientos del laboratorio.

La sala donde se instalará el sistema cuenta con bancos neumáticos, torno Magnum CNC (Allecop), fresadora Supernova CNC (Allecop), y torre-almacén (Allecop), equipos cuyas condiciones operativas deben ser cubiertas simultáneamente. Dentro de un conjunto de equipos neumáticos que trabajan a diferentes presiones, el valor de la presión más alta determina la presión del sistema. La presión requerida por cada equipo del laboratorio se resume en la Tabla 2, notando una presión máxima requerida de 6bar. La presión de trabajo tiene en cuenta la instalación (tuberías, válvulas, filtros, etc.), cuyas pérdidas se compensan, para sistemas sencillos, añadiendo un 10% a la presión ya establecida [14], por lo cual la presión óptima de trabajo para el sistema se establece en 6,6 bar (95,725 psi).

Equipos	Presión requerida [Bar]
Torno CNC	6
Fresadora CNC	6
Cilindros	5.5

Tabla 2. Presión de trabajo de equipos del laboratorio [15].

El consumo nominal de aire comprimido se determina teniendo en cuenta el consumo específico de cada equipo que conforma el sistema a una determinada presión de trabajo. El caudal de aire requerido por equipo es discriminado en la Tabla 3. Teniendo en cuenta las posibles ampliaciones y pérdidas en el sistema, se adicionará un 30% al consumo total, por lo cual el compresor debe generar mínimo 4,9cfm. Este porcentaje en exceso también cubre el factor de utilización basado en la experiencia, ya que, por lo regular no todos los equipos ni tomas de aire son utilizados con la misma periodicidad, así como las fugas, el desgaste y los cambios previsibles en el futuro [14].

Equipo	Cantidad	Consumo específico [cfm]	Factor de utilización	Consumo requerido [cfm]
Torno CNC	1	0,80	0,40	0,32
Fresadora CNC	1	0,80	0,40	0,32
Cilindros	16	0,20	1,00	3,20
Consumo total				3,84

Tabla 3. Caudal de aire comprimido para cada equipo [15].

**B. Evaluación del riesgo.**

Para realizar un análisis de riesgo se utiliza como guía la matriz que ofrece la norma GTC 45-ICONTEC-2011 [16] para elaborar un registro de las actividades de trabajo que se desarrollan al interior del aula. Se identifican aquellas afectadas por los efectos sonoros del funcionamiento de la línea de aire y sus componentes. Se establecen criterios de clasificación que definan factores determinantes como el tipo de proceso, la zona o lugar, las actividades, las tareas, y por ultimo si dicha actividad o actividades son rutinarias [16], como se resume en la Tabla 4. Luego se procede a identificar los peligros existentes; el uso de un compresor de aire crea una situación potencialmente generadora de daño para docentes y estudiantes, debido al nivel sonoro producido por su uso. Otros factores como la conexión de la tubería y otros componentes, también afectan el nivel sonoro. La importancia de un buen análisis de riesgo radica en las consecuencias que acarrea una exposición a altos niveles de ruido, van desde efectos temporales como sensaciones desagradables o molestias y dolores de cabeza, hasta interrupción del patrón de sueño, cambios fisiológicos, cardiovasculares, neurológicos, efectos psicosociales y pérdida de la audición [17].

Proceso	El proceso que se ve directamente afectado por el nivel de ruido son las actividades académicas
Zona/lugar	Para realizar el análisis de riesgo se toma como área a evaluar la sala de robótica, salón 608-A
Actividades	Prácticas de laboratorio
Tareas	Fresado/torneado
	Operación en los bancos neumáticos
	Cátedra
Rutinario	Si

Tabla 4. Factores para el análisis de riesgo [16].

Después de establecer el elevado nivel sonoro como un peligro, se procede a identificar los controles existentes en la fuente, en el medio y en el receptor [16], Tabla 5. Se resalta que los únicos criterios que se establecerán son los referentes a las normativas legales existentes a nivel nacional e internacional, y los obtenidos de los resultados de la evaluación de los riesgos, teniendo en cuenta la suficiencia de los controles existentes. Para evaluar el nivel de riesgo  $N_R$ , se utiliza la expresión

$$N_R = N_P N_C, \tag{1}$$

donde  $N_P$ : nivel de probabilidad y  $N_C$ : nivel de consecuencia. A su vez, el nivel de probabilidad se calcula mediante

$$N_P = N_D N_E, \tag{2}$$

donde  $N_D$ : nivel de deficiencia y  $N_E$ : nivel de exposición.

Fuente	Compresor: genera 78 dB, lo que no excede el límite sonoro permisible establecido por la ley.
Medio	No existen controles
Individuo	El tiempo de exposición para los estudiantes es reducido, máximo de 2 horas/semana. Para docentes no existen controles de igual medida, ya que estos pueden permanecer expuestos por más tiempo.

Tabla 5. Identificación de controles existentes [16].

El nivel de deficiencia es determinado a partir del Tabla 6, sin embargo, debido a que no se cuenta con mediciones cuantitativas de los niveles sonoros para determinar un valor exacto, es necesario combinar la información de la Tabla 6 con una escala cualitativa del nivel de deficiencia de los peligros higiénicos, la cual se presenta en la Tabla 7, en la cual se hace una clasificación de estos según el tipo de agente. Luego de realizar un análisis cualitativo se determina que el nivel de deficiencia es medio, tomando un valor de  $N_D = 2$ .

Para determinar el nivel de exposición se aplican los criterios de la Tabla 8, tomando para este caso  $N_E = 3$ , exposición frecuente. La obtención del nivel de probabilidad  $N_P$  inicia en la Tabla 9, relacionando el nivel de exposición y el nivel de deficiencia, resultando en M-6, una manera tabular (2). Este dato sirve como entrada a la Tabla 10, para un nivel de probabilidad  $N_P$  entre 8 y 6, clasificado como nivel Medio.

A continuación, de la Tabla 11 se determinan los niveles de consecuencia, teniendo en cuenta el nivel de daño más alto que pueda ocurrir por efectos de la actividad evaluada. En este caso, se puede decir por lo evaluado con anterioridad y por la frecuencia de exposición a dichos niveles sonoros, que las consecuencias más graves serian lesiones o enfermedades que no requieren incapacidad, por lo tanto se deduce un valor de  $N_C = 10$ , correspondiente a un nivel de consecuencia Leve. Reemplazando en (1) los valores de  $N_C$  y el rango de  $N_P$ , se obtiene el nivel de riesgo  $N_R$  entre 80 y 60, correspondiente a un nivel de riesgo III, como se lee de la Tabla 12. El nivel de

riesgo III obtenido sirve para entender su significado a través de la Tabla 13, con la recomendación normativa de mejorar, en lo posible, la potencial situación generadora de daño. La aceptabilidad del riesgo nivel III, de acuerdo con la Tabla 14, es ACEPTABLE.

Nivel de deficiencia	N <sub>D</sub>	Significado
Muy alto (MA)	10	Se han detectado peligros que determinan posible generación de incidentes o consecuencias muy significativas, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes respecto al riesgo es nula o no existe, o ambas
Alto (A)	6	Se han detectado algunos peligros que pueden dar lugar a consecuencias significativas, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas es baja, o ambos
Medio (M)	2	Se han detectado peligros que pueden dar lugar a consecuencias poco significativas o de menor importancia o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es moderada, o ambos
Bajo (B)	No se asigna valor	No se ha detectado consecuencia alguna, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es alta, o ambos. El riesgo está controlado

Tabla 6. Determinación del nivel de deficiencia [16].

Tipo de agente: Ruido	
Nivel de deficiencia	Significado
Muy alto	No escuchar una conversación a una intensidad normal a una distancia menos de 50 cm
Alto	Escuchar la conversación a una intensidad normal a una distancia de 1 m
Medio	Escuchar la conversación a una intensidad normal a una distancia de 2 m
Bajo	No hay dificultad para escuchar una conversación a una intensidad normal a más de 2 m

Tabla 7. Determinación cualitativa del nivel de deficiencia de los peligros higiénicos [16].

Nivel de exposición	N <sub>E</sub>	Significado
Continua (EC)	4	La situación de exposición se presenta sin interrupción o varias veces con tiempo prolongado durante la jornada laboral.
Frecuente (EF)	3	La situación de exposición se presenta varias veces durante la jornada laboral por tiempos cortos.
Ocasional (EO)	2	La situación de exposición se presenta alguna vez durante la jornada laboral y por un periodo de tiempo corto.
Esporádica (EE)	1	La situación de exposición se presenta de manera eventual.

Tabla 8. Determinación del nivel de exposición [16].

Niveles de probabilidad		Nivel de exposición (N <sub>E</sub> )			
		4	3	2	1
Nivel de deficiencia (ND)	10	MA – 40	MA – 30	A – 20	A – 10
	6	MA – 24	A – 18	A – 12	M – 6
	2	M – 8	M – 6	B – 4	B – 2

Tabla 9. Determinación del nivel de probabilidad [16].

Nivel de probabilidad	N <sub>P</sub>	Significado
Muy alto (MA)	Entre 40 y 24	Situación deficiente con exposición continua, o muy deficiente con exposición frecuente. Normalmente la materialización del riesgo ocurre con frecuencia.
Alto (A)	Entre 20 y 10	Situación deficiente con exposición frecuente u ocasional, o bien situación muy deficiente con exposición ocasional o esporádica. La materialización del riesgo es posible que suceda varias veces en la vida laboral.
Medio (M)	Entre 8 y 6	Situación deficiente con exposición esporádica, o bien situación mejorable con exposición continuada o frecuente. Es posible que suceda el daño alguna vez.
Bajo (B)	Entre 4 y 2	Situación mejorable con exposición ocasional o esporádica, o situación sin anomalía destacable con cualquier nivel de exposición, o es esperable que se materialice el riesgo, aunque puede ser concebible.

Tabla 10. Significado de los niveles de probabilidad [16].

Nivel de consecuencias	Valor N <sub>C</sub>	Significado (Daños personales)
Mortal o catastrófico (M)	100	Muerte (s)
Muy grave (MG)	60	Lesiones o enfermedades graves irreparables (Incapacidad permanente parcial o invalidez)
Grave (G)	25	Lesiones o enfermedades con incapacidad laboral temporal (ILT)
Leve (L)	10	Lesiones o enfermedades que no requieren incapacidad

Tabla 11. Determinación del nivel de consecuencia [16].

#### A. Evaluación de alternativas de la línea de aire.

Los criterios más relevantes para el diseño de la línea se definen como: 1- rendimiento esperado del sistema, 2- adecuaciones civiles requeridas, 2- condiciones de instalación (complejidad, herramientas), 3- calidad de los equipos y materiales, 4- costos y 5- estética. Las alternativas del circuito se presentan en las Figs. 1 a 4. La alternativa 1, Fig. 1,

contempla el compresor en la parte superior, utilizando tubería galvanizada. La alternativa 2 sugiere el compresor ubicado en la parte superior, Fig. 2, y utilizar tubería de aluminio. La alternativa 3 ubica el compresor dentro de la sala, Fig. 3, con tubería galvanizada. La alternativa 4, Fig. 4, sitúa el compresor dentro de la sala con tubería de aluminio.

Nivel de riesgo	Nivel de probabilidad (Np)				
	40 – 24	20 – 10	8 – 6	4 – 2	
Nivel de consecuencia (Nc)	100	I 4000 – 2400	I 2000 - 1200	I 800 - 600	II 400 – 200
	60	I 2400 – 1440	I 1200 - 600	II 480 – 360	II 240 III 120
	25	I 1000 – 600	II 500 – 250	II 200 – 150	III 100 – 50
	10	II 400 – 240	II 200 III 100	III 80 – 60	III 40 IV 20

Tabla 12. Determinación del nivel de riesgo [16].

Nivel de riesgo	NR	Significado
I	4000 – 600	Situación crítica. Suspender actividades hasta que el riesgo esté bajo control. Intervención urgente.
II	500 – 150	Corregir y adoptar medidas de control de inmediato. Suspenda actividades si el nivel de riesgo está por encima o igual de 360.
III	120 – 40	Mejorar si es posible. Sería conveniente justificar la intervención y su rentabilidad.
IV	20	Mantener las medidas de control existentes, pero se deberían considerar soluciones o mejoras y se deben hacer comprobaciones periódicas para asegurar que el riesgo aún es aceptable.

Tabla 13. Significado de nivel de riesgo [16].

Nivel del riesgo	Significado
I	No aceptable
II	No aceptable o aceptable con control específico
III	Aceptable (Mejorar si es posible)
IV	Aceptable

Tabla 14. Aceptabilidad del riesgo [16].

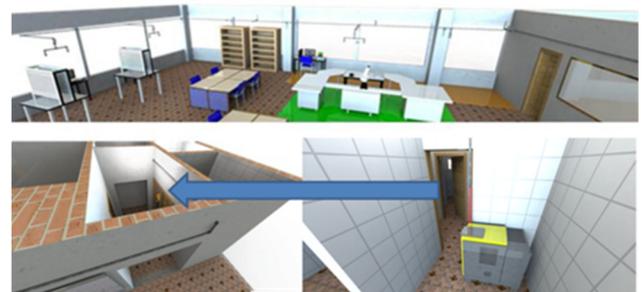
Se les asigna un peso o grado de importancia a cada uno de los cinco criterios establecidos, asociados a una escala de calificación de 1 (menos favorable) a 5 (mayor favorabilidad). Para la calificación de cada criterio, en las discusiones del grupo de trabajo se consideraron las cotizaciones de los distintos fabricantes y las sugerencias obtenidas de sus visitas al laboratorio, previas al montaje de la línea. La Tabla 15 presenta la matriz de evaluación de alternativas. De acuerdo con los resultados la alternativa más viable para el proyecto es la número 4, en la cual se utilizará el compresor dentro del salón utilizando tubería de aluminio.



Figura 1. Alternativa 1.

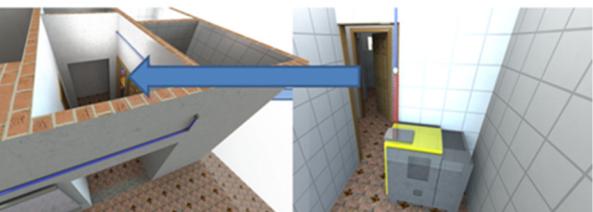


Figura 2. Alternativa 2.



Ubicación del compresor cuarto alejado del área de trabajo

Figura 3. Alternativa 3.



Ubicación del compresor cuarto alejado del área de trabajo

Figura 4. Alternativa 4.

Alt. / %	Rendimiento óptimo del sistema				Costos	Estética	Puntuación
	25%	10%	15%	15%			
Alternativa 1	4	2	2	3	4	3	3,25
Alternativa 2	5	2	4	5	2	4	3,7
Alternativa 3	4	4	1	3	3	2	2,95
Alternativa 4	5	4	5	5	2	5	<b>4,15</b>

Tabla 15. Selección de alternativa.

**B. Componentes.**

El esquema básico de una instalación de aire comprimido consta de un compresor, un equipo o herramienta neumática el cual va a ser alimentado, una red de distribución que conduce el aire comprimido desde el compresor hasta el equipo consumidor y un sistema de control y monitoreo de la presión.

Compresor. Para seleccionar el compresor se tiene presente que los requerimientos de presión y caudal de aire calculado se cumplan, así como la disponibilidad del equipo en el mercado, su nivel sonoro, mantenibilidad y el costo del equipo. En ese orden, se seleccionarían tres alternativas de diferentes fabricantes. En la Tabla 16 están los parámetros de operación y el costo respectivo de cada equipo, lo cual ayudará en la selección del compresor ajustado a las necesidades del proyecto. Finalmente, se llega a la selección del compresor DEWALT puesto que cumple con los parámetros de: presión y caudal de aire requeridos, disponibilidad y costo.

Red de distribución. Los tipos de tuberías para las aplicaciones neumáticas varían de acuerdo con el material en que son elaboradas [18], lo cual determina las ventajas y desventajas. Se consideraron tuberías en acero negro (galvanizado), inoxidable y aluminio, y finalmente se escogió esta última por cuanto es ligera, previene corrosión, presenta menores pérdidas de presión y fácil instalación; además, está disponible en el mercado local. Esta selección cumple la normativa ISO 4414, artículo 5.2.1.1. En cuanto al diseño del circuito de la red, se decide escoger el tipo de red abierta con una tubería principal de la cual se desprenden líneas secundarias y de servicio. Su principal ventaja se establece en la poca inversión inicial. Además, la evacuación de

condensado se logra con inclinaciones de 2% a 3% en la tubería e instalando purgadores en el punto más bajo de la distribución, evitando que el condensado llegue a los equipos o herramientas neumáticas sin necesidad del “cuello de cisne”, simplificando así el montaje [19].

Compresor	P [Bar]	Q [cfm]	Potencia [Hp]	Nivel sonoro [dB]	Costo total (+ envío)
Compresor KAESER PREMIUM COMPACT 160/4 W	20	4,41	1,5	60	\$ 3.528.024
Compresor INGERSOLL RAND 2340L5	12	14.8	1,5	78	\$ 3.674.996
Compresor DEWALT D55146	14	5.0	1,6	78	\$ 1.961.020

Tabla 16. Alternativas de compresores.

Diámetro de la tubería. La ecuación (3) permite calcular el diámetro mínimo de la tubería en mm [14], con base en los factores ΔP: caída de presión [bar], qc: caudal de aire [l/s], d: diámetro interno de la tubería [mm], L: longitud de la tubería [m], y p: presión absoluta inicial [bar].

$$d = \sqrt[5]{450 \times \frac{q_c^{1.85} \times L}{p \times \Delta P}} \tag{3}$$

Sustituyendo en (3) los valores correspondientes ΔP = 0.4 bar, qc = 2.36 l/s (5 cfm), L = 50 m y p = 6.6 bar, se obtiene un diámetro mínimo de 8.5mm. Se procede ahora a seleccionar el diámetro de la tubería de acuerdo con la información provista por el fabricante, como se muestra en la Tabla 17, para obtener un diámetro de 20 mm. La longitud de 50 m de la línea es tomada inicialmente del plano de distribución mostrado en la Fig. 5.

Caudal [cfm]	Longitud de la tubería [m]			
	25	50	75	100
7	20	20	20	20
15	20	20	20	20
24	20	20	20	25
32	20	20	20	25
40	20	20	25	25
Valores a una presión de 7 Bar (100 psi)				

Tabla 17. Selección de diámetro de tubería [20].

**C. Instalación del Sistema de aire comprimido.**

Para la instalación se siguen las recomendaciones de la norma ISO 4414-art. 5.3.2.1, acerca de fácil desmonte sin dañar otros componentes o equipos. Se seleccionan acoples rápidos (ISO 4414-art. 5.4.5.8) para facilitar uso de la línea y los soportes permiten ajuste sin deformar la tubería de aluminio (ISO 4414-art. 5.4.5.5). La válvula de alivio del sistema

requerida de acuerdo a la norma ISO 4414-art. 5.4.3.5 está ubicada en el compresor, y cada una de las válvulas de distribución de cada equipo puede ser operada cuidadosamente para aliviar presión en caso de una emergencia. El diagrama del circuito neumático con los componentes es mostrado en la Fig. 6. Para la instalación se tiene en cuenta no imponer cargas externas sobre la tubería, y se evitan los cambios bruscos del diámetro interno de la tubería, para así prevenir las variaciones de la velocidad del flujo.

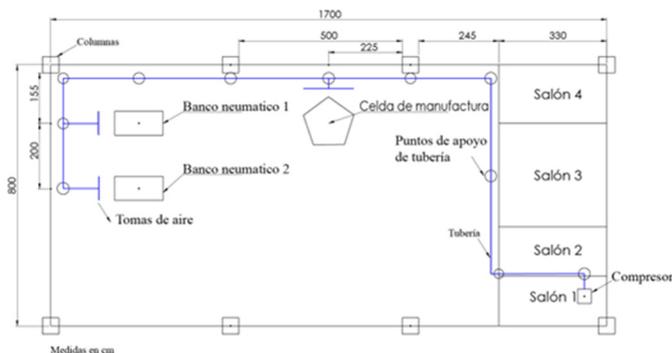


Figura 5. Plano de distribución de la línea, en cm.

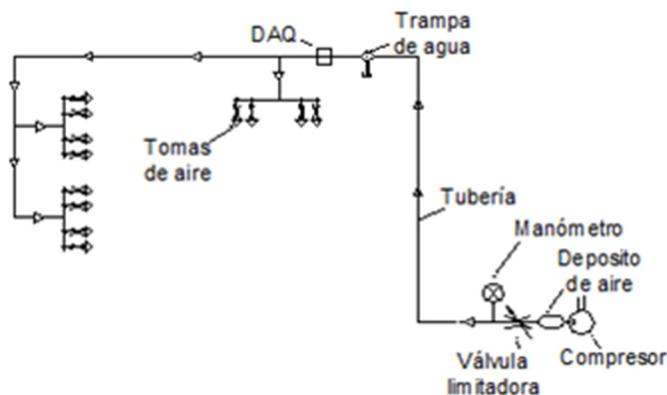


Figura 6. Diagrama de proceso (P&ID) de circuito neumático.

## V. MONITOREO DE LA PRESIÓN

Los sistemas electrónicos de monitoreo de presión son recomendados tanto para sistemas neumáticos de grandes instalaciones industriales, como para pequeños sistemas de aire comprimido [14]. El monitoreo de la presión se hace por medio de un DAQ que integra un sensor, acondicionamiento de señal y un microcontrolador comercial. El sensor-transductor es del tipo piezoeléctrico capacitivo, seleccionado de tal manera que la presión de trabajo no supere el 75% del valor máximo de los límites operacionales del instrumento [8], el rango de trabajo del mismo es de [0, 200] psi, con salida análoga de [0.5, 4.5] V [21].

Los valores análogos de salida de voltaje del sensor están dentro del rango de entradas análogas del microcontrolador, necesiéndose únicamente un circuito básico con un capacitor de 100nF para la supresión de ruido. Se selecciona un

microcontrolador Arduino Uno por la facilidad de uso, disponibilidad comercial, bajo costo e información disponible para su programación. La Fig. 7 muestra el esquemático del DAQ, y la Fig. 8 presenta los elementos reales del sistema.

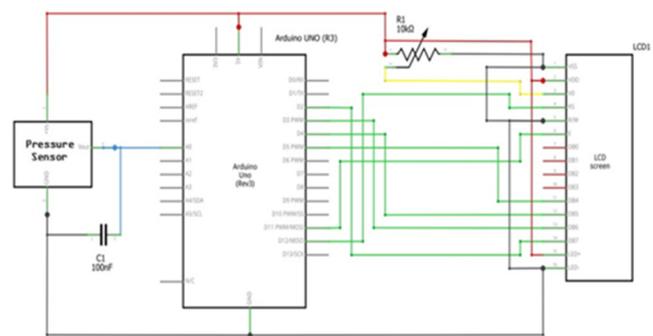


Figura 7. Esquema del circuito del DAQ, en software fritzing [21].

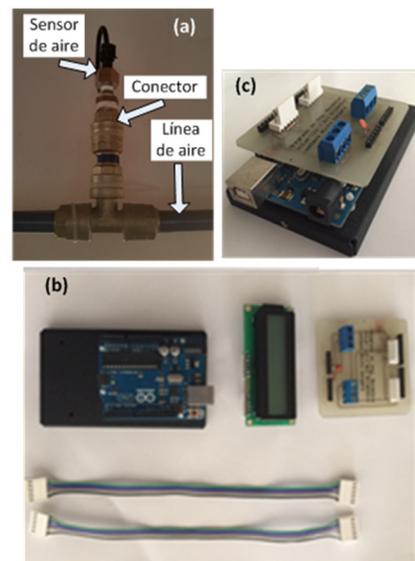


Figura 8. Elementos reales del sistema de adquisición de datos.

La programación del sensor se hace en lenguaje abierto Arduino versión 1.0.5 para Windows 8-32 bits. Puesto que las entradas analógicas del microcontrolador actúan como un medidor de voltaje, con 10 bits convertidos de forma análoga a digital a 1024 ( $2^{10}$ ) valores diferentes, los cuales corresponden a un voltaje entre 0 a 5 V del pin seleccionado, se debe generar el código que haga esta relación de valores. Se utilizaron varios códigos de distribución libre [22], adaptados a las necesidades.

## VI. RESULTADOS

### A. Sistema de aire implementado.

Los pasos descritos permiten la integración de componentes como se ilustra en un modelo CAD en la Fig. 9, con la fotografía del sistema real presentada en la Fig. 10.



Figura 9. Diagrama de red neumática.

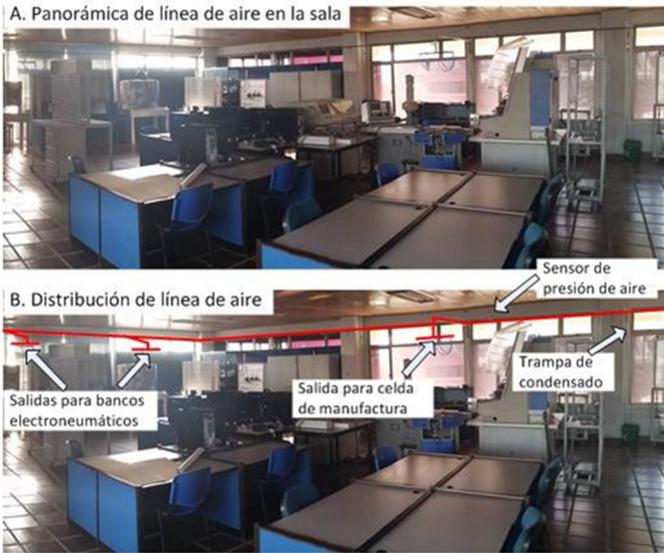


Figura 10. Línea de aire real montada en el laboratorio.

### B. Ecuación del sensor.

La Tabla 18 presenta los datos tomados del DAQ en intervalos de 10psi. La variable independiente se establece como el número Arduino (#ard), y la variable dependiente es la presión leída en el manómetro del compresor. El fabricante del compresor no recomienda trabajar en régimen regular por encima de 150psi, aunque el equipo alcanza 160psi. Así mismo, su manómetro no permite distinguir el valor de la presión por debajo de 20psi, estableciendo este valor como límite inferior. Por facilidad en la obtención de la ecuación del sensor, se toma como variable independiente el número Arduino, rango [0, 1024], que recibe el microcontrolador. Para la variable Y, el rango de [20, 150]psi es adecuado puesto que la presión nominal de trabajo fue establecida en 96psi, valor que cae cerca del 60% del intervalo.

Para obtener la ecuación del sensor se utiliza el modelo de regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados, que proporciona un ajuste polinómico de los datos de la forma

$$y_c = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m, \quad (4)$$

donde  $y_c$  se refiere al valor de la variable y predicho por la ecuación polinómica para un valor dado de  $x$ , Para  $n$  diferentes valores de la variable independiente incluidos en el

análisis, siendo  $m$  el orden más alto del polinomio, y estando restringido a  $m \leq n-1$ . Los valores de  $m$  coeficientes  $a_0, a_1, \dots, a_m$  son determinados por el análisis presentado en la referencia [26], en el cual se tiene en cuenta que para  $n$  valores de  $x$  e  $y$ , denominados  $x_i, y_i$ , donde  $i = 1, 2, \dots, n$ , se busca un polinomio de orden  $m$  basado en un conjunto de  $n$  número de datos de la forma  $(x, y)$  en la que  $x$  e  $y$  son las variables independiente y dependiente, respectivamente.

#	X (#ard)	Y [psi]	#	X (#ard)	Y [psi]
1	185	20	8	460	90
2	225	30	9	501	100
3	264	40	10	538	110
4	304	50	11	575	120
5	343	60	12	614	130
6	382	70	13	653	140
7	421	80	14	691	150

Tabla 18. Conjunto de datos para obtener la ecuación del sensor.

Los coeficientes  $a_i$  del polinomio, limitando (4) a ajuste lineal con  $m=1$ , que hacen mínima la desviación total de los datos se encuentra mediante [24]

$$a_0 = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (6)$$

donde el símbolo  $\Sigma$  indica sumatoria, y  $n$  es el número de pares de datos. El uso de (5) y (6) se facilita por medio del comando "polyfit" [25] de Matlab, cuya sintaxis es polyfit(X, Y, 1), donde X e Y son los vectores de los conjuntos de datos y el número corresponde al orden de la regresión. La curva del sensor correspondiente a los datos de la Tabla 18 es

$$y_c[\text{psi}] = 0.2570x[\text{\#ard}] - 28.0016. \quad (7)$$

A continuación, se evalúan los valores de la variable independiente en la Tabla 18 en (7), y se obtiene la Tabla 19, la cual es la base para la calibración.

### C. Calibración del Sensor

Utilizando nuevamente (5) y (6) para el conjunto de datos de la Tabla 19 se obtiene una curva de calibración del sensor

$$y_c[\text{psi}] = 0.999x[\text{psi}] + 0.0054. \quad (8)$$

La ecuación (8) es programada en el sensor después de (7) para poder simular una calibración estática. A continuación se calcula el intervalo de incertidumbre asociado a esta calibración, para lo cual se debe encontrar primero el error estándar de la curva,  $S_{yx}$ :

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ci})^2}{n - (m + 1)}}, \tag{9}$$

donde m es el grado de la curva (m=1 caso lineal),  $y_{ci}$  se obtiene evaluando la curva en (8) con los valores del estándar o referencia, X, de la Tabla 19. Para calcular ahora el valor esperado,  $y_c$ , se emplea la ecuación

$$y = y_c \pm \sqrt{\left(t_{v,P} \frac{S_{yx}}{\sqrt{n}}\right)^2 + u_0^2}, \tag{10}$$

donde  $t_{v,P}$  es el coeficiente t-Student asociado a los grados de libertad  $v = n - 1$  y al nivel de confiabilidad P, y  $u_0$  es la incertidumbre de orden cero dada por la resolución del manómetro, Res:

$$u_0 = \pm \frac{1}{2} \text{Res}, @95\%. \tag{11}$$

Empleando (10) para el conjunto de datos del Tabla 19 se obtiene:  $S_{yx} = 0.3361\text{psi}$ ;  $n = 14$ , y para un nivel de confiabilidad del 95%,  $t_{13,95\%} = 2.160$  de la tabla 4.4 de la referencia [24]. La resolución del instrumento es  $\pm 5\text{psi}$ , de donde  $u_0 = 2.5\text{psi}$ , y se obtiene una ecuación de calibración estática propuesta para este caso, dada en (12).

$$y_c[\text{psi}] = 0.999x[\text{psi}] + 0.0054 \pm 2.5075, @95\% \tag{12}$$

#	X [psi] estándar	Yc [psi] ecuación (9)	#	X [psi] estándar	Yc [psi] ecuación (9)
1	20	19.541	8	90	90.213
2	30	29.821	9	100	100.750
3	40	39.843	10	110	110.258
4	50	50.123	11	120	119.767
5	60	60.146	12	130	129.787
6	70	70.168	13	140	139.812
7	80	80.191	14	150	149.578

Tabla 19. Datos en psi para calibración.

De la ecuación (12) se distingue un error de intercepto muy bajo, de 0.0054psi, equivalente en el rango de trabajo [20,150]psi al 0.0042%. También de la ecuación (12) se distingue un error de multiplicación de -0.001psi/psi, desviado solo -0.1% con respecto al valor ideal. Los anteriores son valores satisfactorios. La importancia de (12) radica en que la línea de aire diseñada puede ser utilizada en posteriores proyectos académicos o investigativos, y el margen de incertidumbre es necesario en algunos casos; por ejemplo, una medición de 46psi en el sensor, en realidad, de acuerdo con (11) tendrá un valor esperado en el intervalo [43.4519, 48.4669]psi.

Por último, se calcula la fortaleza de la correlación lineal de la curva de calibración mediante la determinación del coeficiente de correlación [24]:

$$r = \sqrt{1 - \left(\frac{S_{yx}}{S_y}\right)^2}, \tag{13}$$

donde  $S_y$  es la desviación estándar. La aplicación de la ecuación (13) para los datos del Tabla 19 arroja  $r = 0.99997$ . Para un conjunto de 14 datos como el usado en el Tabla 19, el coeficiente crítico es de 0.532 [26] a una confiabilidad del 95%. Puesto que el coeficiente calculado es mayor al crítico, se considera satisfactoria al 95%. La curva de calibración se presenta en la Figura 13.

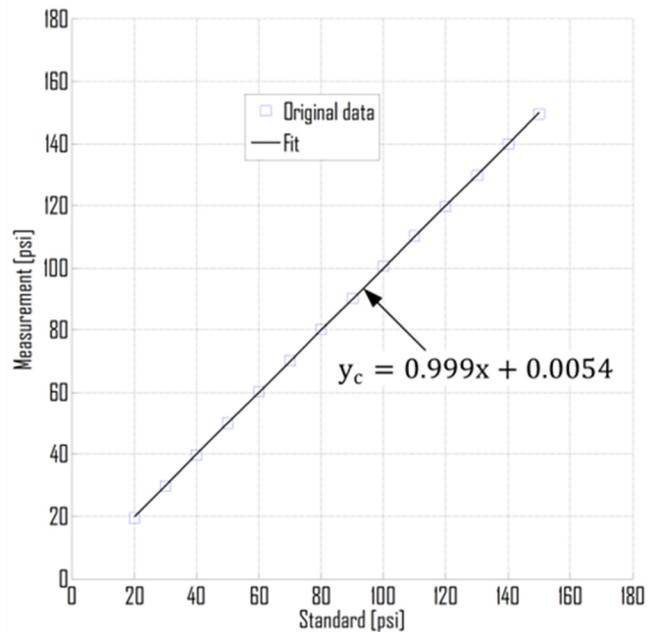


Figura 11. Curva de calibración del sensor.

## VII. CONCLUSIONES

Se presentó el proceso de diseño e instrumentación de una línea de suministro de aire comprimido para un laboratorio universitario con equipos de Robótica, Electroneumática y Máquinas CNC. Para el dimensionamiento del compresor se tuvieron en cuenta las necesidades de presión y caudal de los equipos, resultando en un equipo de 5cfm a una presión máxima de 150psi, obtenidos después de considerar la normativa para requisitos de seguridad de sistemas neumáticos y análisis de riesgo de acuerdo con la aplicación.

El diseño de la línea se realizó mediante la consideración de alternativas que se establecieron teniendo en cuenta los usuarios de la sala y potenciales proveedores de servicios del proyecto, tomando una matriz de evaluación para calificar cada aspecto considerado importante. Se optó por un diseño con el compresor dentro del laboratorio, y una línea de aire de tubería en aluminio. Lo anterior, sumado a la revisión de ensamble realizada por profesionales externos garantiza una línea segura en su uso. Para facilitar el montaje y la

disposición de elementos y soportes, se desarrollaron los planos estructurales y neumáticos correspondientes.

La instrumentación de la línea para visualización del valor de la presión dentro de la sala, se hizo con un sensor-transductor que permite la manipulación del valor de presión mediante software. La curva del sensor fue hallada y utilizada para una posterior calibración del mismo, proponiendo la curva de calibración que muestra una fuerte correlación a un 95% de confiabilidad. Mediante esta curva se determinaron también los errores de cero y de multiplicación del sistema de adquisición de datos. Se determinó el intervalo de incertidumbre para 95%, que servirá como referencia para el estimado tanto de punto como de intervalo, útil para proyectos futuros que necesiten el valor de la presión de la línea.

Se recomienda la medición de la intensidad de ruido en la zona de trabajo, para verificar los niveles permisibles de los mismos, y evaluar la necesidad de insonorización del cuarto en el cual está el compresor. También se sugiere respetar el intervalo de trabajo para el cual el sensor fue calibrado, [20, 150]psi, para evitar valores extraños en las mediciones. Estos deben ser tenidos en cuenta y actualizados para futuras modificaciones y mejoras al sistema entregado.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico.

#### REFERENCIAS

- [1]. A. Serrano, *Neumática Práctica*. Madrid: Paraninfo, 2009.
- [2]. A. Güillén, *Introducción a la Neumática*. Barcelona: Marcombo, S.A., 1988.
- [3]. A. Creus, *Neumática e Hidráulica*, 2da ed. Barcelona: Marcombo S.A., 2010.
- [4]. Asociación Colombiana de Ingenieros Eléctricos, Mecánicos y Afines-ACIEM. “Áreas de Formación de los Ingenieros”, Bogotá. ACIEM, 2006.
- [5]. Código sustantivo del trabajo. Colombia. Decreto 2663 (1950, agosto, 5). [online]. Disponible: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=33104>
- [6]. J. Cegarra, *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica*. Madrid: Ed. Díaz de Santos, 2004.
- [7]. R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 5ta ed. Perú: McGraw Hill, 2010.
- [8]. *ISO Normativa General y Requisitos de Seguridad para los Sistemas Neumáticos y sus Componentes*, ISO 4414-2010, p. 37, 2010.
- [9]. *OSHA Normas de Seguridad y Salud Ocupacional*, OSHA 1910-1970, 1970.
- [10]. *OSHA Exposición al Ruido Ocupacional*, OSHA 1910.95, 1970.
- [11]. Código sustantivo del trabajo. Colombia. Decreto 2566 (7, julio, 2014), Tabla de enfermedades profesionales. [online]. Disponible: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=36783>
- [12]. *ISO Aire Comprimido: Contaminantes y Clases de Purezas*, ISO 8573-1, 3er. ed. Suiza, p. 9, 2010.
- [13]. *Guía Sobre la Calidad del Aire*, Ingersoll Rand Industrial Technologies, Madrid, p. 11, 2007.
- [14]. *Manual del aire comprimido*, Atlas Copco Airpower NV., 7ma ed. Bélgica, p. 136, 2011.
- [15]. L. Bolívar, C. Miranda y R. Vergara, “Recuperación mecánico-electrónica, implementación de software de simulación CNC y diseño de guías didácticas para su aplicación como sistema de enseñanza torno CNC Magnum y controlador Fagor 8025 incluidos en la celda de manufactura ALLECOP,” tesis de pregrado, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2010.
- [16]. *Guía Técnica Colombiana 45, Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos de seguridad y salud ocupacional*, GTC 45, 2011.
- [17]. J. Rivera, “El ruido: efectos auditivos y extras auditivos,” presentado en diplomado de Salud Ocupacional y Seguridad Industrial, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, p. 71, 2008.
- [18]. *Catálogo Air Express Store*, Integradora de compresores en Mexico ICM, México.
- [19]. E. Carnicer, *Aire comprimido: teoría y cálculo de las Instalaciones*. 2 ed., Barcelona, Paraninfo, p. 296, 1994.
- [20]. *Catálogo A.R.T. Pneumatic Equipment*, Selección de Diámetro de Tubería.
- [21]. Ebay website, “Captador de tensión para aceite, combustible, agua y aire: 200psi,” 2014. [online]. Disponible: <http://www.ebay.com/itm/Pressure-transducer-or-sender-200-psi-stainless-steel-for-oil-fuel-air-water-/251409770867>
- [22]. Bildr.blog, “Código de programación en Arduino para un sensores de proximidad,” 2011. [online]. Disponible: <http://bildr.org/2011/03/various-proximity-sensors-arduino/>
- [23]. Fritzing Corporation, Fritzing software, version 0.9.2b abril 3, 2015. [online]. Disponible: <http://fritzing.org/download/>
- [24]. R. Figliola and D. Beasley, “Theory and design for mechanical measurements,” 5ta ed. Michigan, p.516, 2011.
- [25]. E. Romero Rodríguez, “Métodos Numéricos,” Universidad de San Gil, Colombia. 2007. [online]. Disponible: [http://www.geocities.ws/datos\\_universidad/MNumericos/AjusteDeCurvas.pdf](http://www.geocities.ws/datos_universidad/MNumericos/AjusteDeCurvas.pdf)
- [26]. M. Triola, “Formulas and Tables,” Pearson Education Inc., p. 8, 2015. [online]. Disponible: [http://www.pstcc.edu/math/\\_files/pdf/1530FormulaCardEssentialsI.pdf](http://www.pstcc.edu/math/_files/pdf/1530FormulaCardEssentialsI.pdf)