

MÉTODO DE DISEÑO DE UN SISTEMA HIDRÁULICO DE POTENCIA PARA LA AGITACIÓN DE UN TACHO

RESUMEN

Este artículo describe el proceso de diseño del sistema hidráulico para la agitación de la melaza (miel B) dentro de un tacho, donde se efectúa un proceso de transferencia de calor homogéneo, como un caso de estudio real en la industria azucarera.

A partir de una necesidad específica: el diseño de un sistema hidráulico para la operación de un tacho, se desarrolla una metodología y se describe el proyecto de ingeniería en todas las etapas de diseño: las especificaciones técnicas a cumplir, las condiciones del trabajo a efectuar, los cálculos de diseño y las consideraciones para la selección de componentes.

PALABRAS CLAVES: Cristalizar, meladura, tacho, diseño, sistema hidráulico.

ABSTRACT

This article describes the process of design of the hydraulic system for the agitation of cane syrup (miel B) inside a metallic container, where a homogeneous heat transfer process is performed, like a case of study real in the sugar industry.

From the initial conditions specified for the application unfolds the methodology and the project of engineering is described in all the phases of design: the technical specifications to comply, the conditions of the work to perform, the calculations of design and the considerations for the selection of components.

KEYWORDS: to crystallize, cane syrup, metallic container, design, hydraulic system.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de producción de azúcar existen varias etapas, entre las cuales está el proceso de formación y crecimiento de grano, llamada cristalización. En esta etapa se producen y desarrollan los cristales a partir de la meladura y/o mieles que alimentan a un tacho¹. El proceso consiste en alimentar a un tacho con una cantidad de cristales que servirán de focos para el depósito de la sacarosa que contiene la meladura, dado que al depositarse la sacarosa, sobre los pequeños cristales, estos comienzan a crecer, regulándose el crecimiento con el control de meladura.

Para mantener la temperatura adecuada y homogénea en toda la mezcla dentro del tacho, es necesario revolver constantemente la masa, con una rapidez tal que permita optimizar la transferencia de calor entre el vapor y la melaza. Esta función es realizada por un agitador en forma de aspas, accionado por una fuente motriz que puede ser un motor hidráulico.

Los sistemas hidráulicos, al igual que cualquier otro tipo de sistemas, surgen como solución a una necesidad

técnica, teniendo en cuenta los requerimientos de operación y funcionamiento de la aplicación. Estos tipos de sistemas pasan por etapas de diseño, selección, compra, instalación y puesta en marcha, hasta la etapa de operación y mantenimiento.

En este trabajo se especifican las etapas que van desde la identificación de los requerimientos para satisfacer una necesidad técnica, hasta definir las condiciones que permiten la selección de los componentes del sistema hidráulico, que serán utilizados en el proceso de agitación de la melaza dentro de un tacho.

2. CONTENIDO

El diseño de cualquier tipo de sistema industrial debe considerar sus particularidades en relación con las exigencias, características y especificaciones de las necesidades a satisfacer para la aplicación. El diseñador debe involucrarse en el problema planteado y buscar toda la información posible al respecto, de manera que cualquier dato, relacionado con los parámetros de diseño que haya sido ignorado al inicio, se conozca antes de comenzar a desarrollar el proyecto. Una vez especificada completamente la necesidad, se procede a identificar la naturaleza del sistema que mejor se ajuste al requerimiento inicial (sistema eléctrico, mecánico, neumático, hidráulico).

HERNANDO ROJAS CANO

Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
heroaca@utp.edu.co

ELIZABETH LONDOÑO C.

Ingeniero Mecánico
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
elizabeth@utp.edu.co

WALDO LIZCANO GOMEZ

Ingeniero Mecánico
Coordinador Programas en Jornada Especial
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira
wlizcano@utp.edu.co

¹ Recipiente presurizado al vacío donde se acaba de cocer el melado de caña y se le da el punto para la cristalización del azúcar.

Es importante considerar, durante la etapa de diseño, el espacio disponible para la instalación del sistema requerido y los recursos económicos establecidos para la aplicación, lo cual marca la pauta a la hora de la selección de los componentes y montaje del sistema.

En el caso del sistema de operación de un tacho las exigencias están relacionadas primordialmente con las características del fluido y del movimiento del mismo, acorde con la temperatura y la transferencia de calor determinada por el proceso. Para este tipo de aplicación se implementa como solución un sistema hidráulico y se diseña un agitador, que a una determinada velocidad de giro, movilice la masa según requerimiento. Antes de empezar a determinar las características de todos los componentes, se realiza un bosquejo del sistema hidráulico y un esquema del plano isométrico, donde se plantea la ubicación real de los elementos en el espacio, y los requerimientos de accesorios (codos, uniones, longitudes de los ductos, etc.), necesarios para llevar a cabo la instalación del sistema. Finalmente, con las condiciones máximas de trabajo, se calcula la potencia necesaria en el motor hidráulico y se dimensiona el resto del sistema.

En la aplicación particular del tacho es de tener en cuenta que la potencia requerida para el funcionamiento es variable y depende de la magnitud de la carga; por ende, el sistema se diseña para que pueda operar a condiciones máximas de trabajo².

A continuación se especifican las consideraciones teóricas necesarias para efectuar el desarrollo práctico de la aplicación. Dicho desarrollo práctico será tema de un nuevo artículo.

2.1 Consideraciones para determinar las características del motor hidráulico

La potencia del motor hidráulico depende del tipo de flujo, es decir, si es laminar, turbulento o de transición - y de las proporciones geométricas de todo el equipamiento.

Las variables a considerar en el análisis son:

- Medidas del tanque y del agitador
- Viscosidad μ y la densidad ρ del fluido.
- La velocidad de giro del agitador.

Debido a que la viscosidad de la Miel B, por las características del proceso, depende sólo de la temperatura, comportándose de acuerdo con la Ley de Viscosidad de Newton, se concluye que la Miel B es un fluido newtoniano.

Una importante consideración en el diseño de un recipiente de agitación es el cálculo de la potencia para

mover el agitador. La potencia requerida para un sistema dado no puede ser calculada teóricamente, aún en el sistema más simple, sino que tiene que ser estudiado con el mismo tipo de experimento cuantitativo, orientado por el análisis dimensional aplicado a diferentes tipos de problemas en el área de fluidos.

2.1.1 Cálculos para satisfacer las necesidades motrices del sistema

- *Número de Reynolds:*

Para esta aplicación el número de Reynolds es calculado bajo la siguiente expresión:

$$Re = \frac{D_a^2 * N * \rho}{\mu} \quad [1]$$

donde:

D_a : Distancia entre aspas

N : Número de revoluciones por segundo

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad absoluta

Debido a que esta fórmula es adimensional, las cantidades deben encontrarse en el mismo sistema de medida.

- *Cálculo de la Potencia requerida del sistema:*

Para calcular la potencia se necesita conocer el número de Reynolds y el Número de potencia N_p .

Acorde con las condiciones establecidas para el sistema dado, el número de potencia se obtiene de la figura 1 [2].

Para leer esta gráfica se necesita el número de Reynolds, Re , y el paso, D_a , entre aspas.

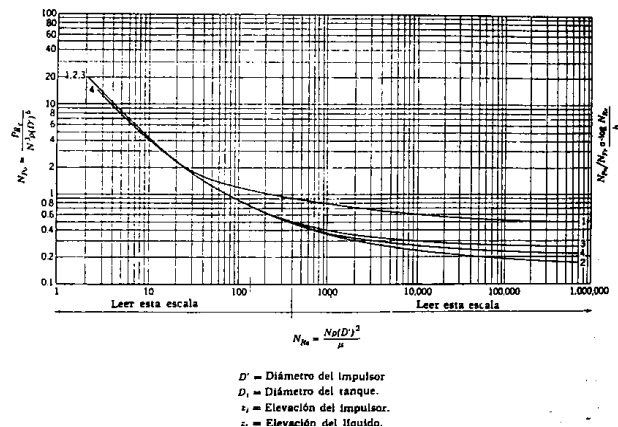


Figura 1. Gráfica para determinar el número de potencia

Con lo anterior, se calcula finalmente la potencia requerida por el sistema motriz de esta aplicación con la expresión:

$$\dot{W}_{out} = N_p \rho N^3 D_A^5 \quad [2]$$

² Un sistema que cumpla con las condiciones máximas de trabajo, podrá operar en un rango inferior a las mismas con los elementos adecuados para ello.

donde \dot{W}_{out} es la potencia requerida por el sistema.

Conociendo el valor de la potencia y de las RPM requeridas, se obtiene el torque necesario para la aplicación:

$$T = \frac{\dot{W}_{out}}{\omega} \quad [3]$$

donde:

T : Torque requerido

ω : Velocidad Angular

2.1.2 Cálculos para seleccionar el motor hidráulico

Todo motor tiene una potencia de salida, una potencia de entrada y una eficiencia. Debido a las condiciones de funcionamiento de estos aparatos, la potencia de entrada se convierte en la potencia mecánica de salida disponible y en una potencia perdida, que se manifiesta en calor y aumento de temperatura del fluido de trabajo³.

- *Potencia de salida:* La potencia de salida de un sistema rotatorio se considera como el producto de la velocidad angular por el torque disponible. Estas variables son las requeridas por la aplicación en su condición máxima de trabajo⁴.

$$\dot{W}_{out} = T * \omega \quad [4]$$

donde:

T : Torque requerido (salida)

ω : Velocidad Angular (salida)

Es de tener en cuenta que esta potencia es variable dependiendo de las condiciones del sistema.⁵

- *Potencia de entrada:* La potencia de entrada a un motor hidráulico se considera como el producto del caudal por la presión:

$$\dot{W}_{in} = \dot{V} * P \quad [5]$$

donde:

\dot{V} : Caudal

P : Presión

Al igual que la potencia de salida, la potencia de entrada también es variable y cambia de acuerdo a las condiciones de la operación.⁶

- *Calor generado por el motor:* La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida es el flujo de calor generado por el sistema [5].

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out} \quad [6]$$

donde:

\dot{Q}_{gen} : Calor generado

\dot{W}_{in} : Potencia de entrada

\dot{W}_{out} : Potencia de salida

Para cuestiones de diseño, este calor debe tomarse como el calor máximo generado por la aplicación –condiciones máximas de trabajo-.

- *Eficiencia mecánica del motor:* Con los datos anteriores, se calcula la eficiencia mecánica del motor:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_{in}} * 100\% \quad [7]$$

Aplicando estas expresiones a las variables manejadas por los sistemas y teniendo en cuenta las unidades dimensionales de las mismas, sabiendo que GPM es galones por minuto, se tiene que:

$$\eta = \frac{RPM * T(lb \cdot in)}{GPM * PSI * 36,7} * 100\% \quad [8]$$

2.2 Criterios para la selección de la tubería

Para seleccionar la tubería, es necesario tener en cuenta la máxima velocidad de flujo permitida, la presión máxima de trabajo del sistema, los requerimientos visuales y económicos de la instalación.

Los ductos de conexión deben soportar las presiones de trabajo con un margen de seguridad aceptable⁷ y deben seleccionarse acorde con las necesidades de la instalación y la ubicación de la misma –tipo de fluido, temperaturas de operación, vibración y movimiento relativo entre las partes, entre otros.

Los tipos de conexiones posibles son: conexión flexible (manguera), tubería metálica flexible o *tubing* (acero y plástico), tubería rígida o *pipes* (acero).

Las conexiones flexibles permiten movimientos relativos entre las partes. La literatura técnica y la experiencia recomiendan su uso en las conexiones de los elementos actuadores y de control donde se pueda encontrar vibración en el sistema.

La tubería metálica flexible (*tubing*) y la tubería rígida pueden utilizarse en las mismas situaciones; pero es conveniente recordar que la flexibilidad del *tubing* conllevan al uso de un menor número de accesorios y un

³ Para que el funcionamiento del sistema se presente de forma adecuada, es necesario evacuar del fluido de trabajo el calor que ha sido generado por las pérdidas de funcionamiento del sistema.

⁴ Condición para la cual se diseña el sistema hidráulico.

⁵ Dependiendo de la aplicación, las RPM se mantienen constantes y el torque depende de la carga.

⁶ Si la aplicación se realiza a una velocidad constante, las variaciones de la carga implicarán un aumento o disminución en la presión del sistema.

⁷ Durante el cierre de una válvula se pueden presentar picos de presión de hasta cuatro veces la presión de trabajo.

aparente mejor acabado de la instalación, mientras que la tubería rígida es más económica.

2.2.1 Tubería de la línea de succión

Acorde con las normas vigentes, la velocidad recomendada en la succión debe estar por debajo de 4ft/s.

2.2.2 Tubería de la línea de retorno

Acorde con las normas vigentes, la velocidad recomendada en la descarga debe estar por debajo de 10 ft/s.

2.2.3 Tubería de la línea de presión:

Acorde con las normas vigentes, la velocidad recomendada en la descarga debe estar por debajo de 15 ft/s.

2.2.4 Cálculo del diámetro interno de la tubería:

La expresión para encontrar el diámetro de la tubería de succión, presión y retorno es la siguiente:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad [9]$$

donde:

D: Diámetro interior de la tubería en in

A: Área de la sección transversal de la tubería en in²

Para determinar el área de la sección transversal de la tubería se utiliza la siguiente expresión [4]:

$$A = \frac{Q * 0,3208}{V} \quad [10]$$

donde:

Q: Caudal requerido en gal/min

V: Velocidad en ft/s

Para propósitos prácticos, en algunos casos, se diseña toda la instalación -excepto la entrada de la bomba- con ductos de igual diámetro, determinados por las características de flujo de la línea de retorno.

2.2.5 Cálculo de la presión de Explosión

La presión de explosión es la presión del fluido que podría causar que la tubería explote. Esto pasa cuando el esfuerzo de tensión (σ) es igual al esfuerzo de tensión del material de la tubería (S) [4].

$$BP = \frac{2tS}{D_i} \quad [11]$$

donde:

BP: Presión de explosión

t: Espesor de la pared del tubo

S: Esfuerzo de tensión

D_i: Diámetro interior de la tubería

2.2.6 Cálculo de la Presión de Trabajo

La presión de trabajo -WP- es la máxima segura presión de operación del fluido y está definida como:

$$WP = \frac{BP}{FS} \quad [12]$$

donde:

BP: Presión de explosión

FS: Factor de seguridad

El factor de seguridad se escoge de acuerdo a la máxima presión de trabajo del sistema.

2.3 Criterios para la selección de la válvula direccional

La válvula direccional se selecciona de acuerdo a la aplicación requerida por el sistema, teniendo en cuenta las especificaciones de caudal y presión en el mismo.

2.4 Criterios para la selección de la válvula de alivio

La válvula de alivio se selecciona con la presión máxima que se desea controlar en el sistema y el caudal necesario.

2.5 Criterios para la selección de la válvula de cheque

La válvula de cheque se selecciona con la presión requerida por el sistema y el caudal necesario.

2.6 Criterios para la selección de la bomba

Para seleccionar la bomba se debe conocer la presión máxima del sistema y el caudal requerido por el motor hidráulico.

La cabeza de presión entregada por la bomba es la máxima presión del sistema, y es igual a la presión requerida por los actuadores más las pérdidas generadas a lo largo de la instalación. Esta presión también es igual a la presión a la salida de la bomba menos la presión a la entrada de la misma. La presión a la salida de la bomba se calcula como se indica en el siguiente ítem. Para encontrar la presión a la entrada de la bomba se debe aplicar la ecuación de energía entre el nivel del tanque y la entrada a ella; el único accesorio existente es el filtro de succión, que generalmente produce una caída de presión pequeña según los catálogos. La presión ejercida por la altura de aceite que se encuentra por encima del nivel de la bomba también es pequeña, por lo tanto, en atención a los niveles de presión existentes en un sistema hidráulico de potencia fluida, la presión manométrica a la entrada de la bomba se puede considerar despreciable -comparada con la de salida- y la presión a la salida de la bomba se convierte en la presión máxima del sistema.

2.6.1 Cálculo de la presión a la salida de la bomba

Para determinar la presión a la salida de la bomba se debe aplicar la ecuación de la energía entre los puntos 1 (salida de la bomba) y 2 (descarga al reservorio).

Ecuación de la energía:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - H_M - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad [13]$$

donde:

P_1 : Presión a la salida de la bomba

γ : Peso específico del fluido (aceite hidráulico)

V_1 : Velocidad a la salida de la bomba

Z_1 : Altura de salida de la bomba respecto a un Nivel de referencia

H_M : Cabeza requerida por el motor

H_L : Cabeza total de pérdidas primarias y secundarias (tubería, elementos y accesorios)

P_2 : Presión a la entrada del reservorio (por lo general es la atmosférica ya que el tanque consta de un dispositivo de venteo)

V_2 : Velocidad a la descarga en el reservorio

Z_2 : Altura de la entrada al reservorio respecto a un nivel de referencia

Pérdidas primarias:

$$H_L = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad [14]$$

donde:

f: factor de fricción. Para flujo turbulento se obtiene del diagrama de Moody y para flujo laminar de la expresión:

$$f = \frac{64}{Re} \quad [15]$$

donde:

L: longitud total de la tubería en ft

D: Diámetro de la tubería en ft

V: Velocidad en la línea de presión en ft/s

g: gravedad en ft/s²

Re: Número de Reynolds

Número de Reynolds [4]:

$$Re = \frac{7740V * D}{\nu} \quad [16]$$

donde:

V: Velocidad del fluido en ft/s

D: Diámetro interno de la tubería en in

ν : Viscosidad cinemática en cS

Pérdidas secundarias:

$$H_L = K \frac{V^2}{2g} \quad [17]$$

donde:

K: Factor de pérdidas en accesorios

V: Velocidad en la línea de presión en ft/s

g: gravedad en ft/s²

2.6.2 Cálculo de la potencia de la bomba

La potencia entregada por la bomba se calcula con la siguiente expresión:

$$W_{sal} = P * Q * 0,0007 \quad [18]$$

donde:

W_{sal} : Potencia de salida de la bomba en hp

P: Presión a la salida de la bomba en psi

Q: Caudal en gal/min

La potencia requerida por la bomba se calcula con la siguiente expresión:

$$\dot{W}_{in} = \frac{\dot{W}_{sal}}{\eta_{bomba}} \quad [19]$$

donde:

W_{in} : Potencia de entrada o requerida de la bomba en hp

η_{bomba} : Eficiencia global de la bomba

W_{sal} : Potencia de salida en hp

2.7 Criterios para la selección del motor eléctrico

Para seleccionar el motor eléctrico se debe conocer la potencia requerida por la bomba y la velocidad de giro de la misma, la fuente de alimentación - la naturaleza del servicio de energía eléctrica y el nivel de voltaje disponible-, el ciclo de trabajo (continuo o intermitente).

Así mismo se debe considerar las condiciones ambientales de la instalación y algunas características como el acoplamiento de la carga, los accesorios y modificaciones mecánicas necesarias.

2.7.1 Cálculo de la potencia del motor eléctrico

La potencia del motor eléctrico es igual a la potencia requerida por la bomba.

2.8 Criterios para la selección de filtros

- Filtro de succión: Para seleccionar el filtro de succión se debe conocer la presión de aspiración y el caudal máximo para tener una pérdida de presión mínima.
- Filtro de retorno: Para seleccionar el filtro de retorno se deben considerar aspectos tales como: la viscosidad del fluido, el caudal requerido, la clase de limpieza del aceite, el tipo de elemento filtrante.

El caudal para seleccionar el filtro se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q_f = f * Q \quad [20]$$

donde:

f: Factor de influencia de la viscosidad

Q: Caudal de retorno

De acuerdo a la viscosidad del aceite hidráulico utilizado en la aplicación se obtiene el factor de influencia de la viscosidad de la gráfica factor f vs viscosidad cinemática de servicio (figura 2).

La clase de limpieza del aceite y la malla de filtración absoluta en μm se determina de acuerdo al tipo de equipos utilizados en la aplicación correspondiente.

2.9 Criterios para la selección del aceite hidráulico

El aceite hidráulico como componente del sistema, debe ser escogido de acuerdo a las especificaciones de todos los componentes del mismo, de tal manera que sea compatible con cada uno de ellos.

2.10 Criterios para la selección del reservorio

Para seleccionar el reservorio se debe tener en cuenta que [9, 10]:

- Las partículas sólidas deben permanecer asentadas (en el fondo) en el reservorio y el aire debe salir fácilmente.
- Todo el aceite contenido en el sistema se pueda almacenar en él.
- El nivel de aceite debe ser suficiente para evitar entrada de aire a la bomba, lo que posiblemente provocaría cavitación.
- El volumen sea lo suficientemente grande para disipar la mayor cantidad de calor generado en el sistema.
- El volumen de aire sea adecuado para permitir la expansión térmica del aceite.

De acuerdo a lo anterior y considerando una regla práctica de quienes trabajan con el tema, se tiene que el tamaño del reservorio en gal o m^3 , debe ser igual a tres veces el flujo volumétrico requerido por el sistema en gal/min o m^3 /min, respectivamente.

$$V = (3\text{min}) * Q \quad [21]$$

donde:

V = volumen del reservorio en gal

Q = flujo volumétrico o caudal en gal/min

Las etapas descritas anteriormente permiten conocer los criterios para seleccionar los componentes. A partir de esto, se puede proceder a la compra de componentes y montaje del sistema.

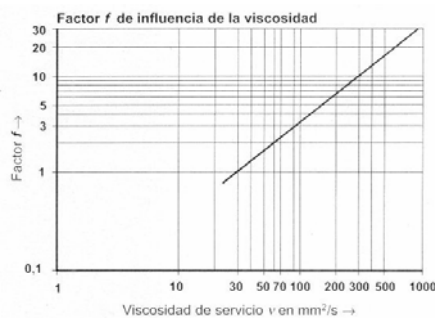


Figura 2. Factor de influencia de la viscosidad vs. viscosidad cinemática de servicio.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La determinación de los requerimientos del sistema es básico para la formulación del circuito hidráulico.

- El diseño de un sistema depende de las características de los componentes que lo conforman, por tanto, es una actividad de tipo iterativo, en la cual se parte de un diseño aproximado y se realizan ajustes dependiendo de las características individuales en el momento de la selección de los componentes, hasta llegar a un diseño estable.
- Todo circuito hidráulico tiene sus particularidades propias de acuerdo con las necesidades de la aplicación. A pesar de que existen recomendaciones generales, la configuración y el diseño se ajustan a las condiciones particulares.
- Aplicaciones de baja velocidad y alto torque pueden ser solucionadas de forma práctica por medio de una instalación hidráulica.
- El manejo de la ecuación de energía varía a medida que se seleccionan los componentes que hacen parte del sistema, y cada cambio genera una modificación en las características del mismo.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALAN S., Foust; LEONARD A. Wenzel, And Others. Principios de Operaciones Unitarias, primera edición, Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1961.
- [2] BROWN, George Granger; And others. Operaciones Básicas de la Ingeniería Química, primera edición, editorial Marín S.A., Barcelona, 1955.
- [3] DAUGHERTY, Robert Franzini; JOSEPH FINNEMORE, E. John. Fluid Mechanics with Engineering Applications, primera edición, McGraw Hill Company, Singapur, 1998.
- [4] ESPOSITO, Anthony. Fluid Power with Applications, quinta edición, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- [5] Design Engineers Handbook. Bulletin 0224-B1. Fluidpower Group. Parker Hannifin Corporation. Cleveland, USA, 1979.
- [6] American National Standard. Hydraulic Fluid Power: System Standard for Stationary Industrial Machinery. ANSI/(NFPA/JIC) T2.24.1.1991.
- [7] American National Standard. Fluid Power Systems and Products - Glossary. ANSI/B93.2, 1986.
- [8] Analyzing Hydraulic Systems. Bulletin 0222-B1. Training department, Fluidpower Group. Parker Hannifin Corporation. Cleveland, USA, 1987.
- [9] International Standard ISO 1219-1. Fluid Power Systems and Components: Graphic Symbols and Circuit Diagrams. Part 1: Graphic Symbols, Switzerland, 1991.
- [10] International Standard ISO 1219-2. Fluid Power Systems and Components: Graphic Symbols and Circuit Diagrams. Part 2: Circuit Diagrams, Switzerland, 1991.