

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Modelado del Sistema Neumático en los Biorreactores de Inmersión
Temporal.**

Autor: Daymí Domínguez González

Tutor(es): Msc. Alberto Gómez Abreu

Dr. Angel Ernesto Rubio Rodríguez

Santa Clara, 2009

"Año del 50 Aniversario del triunfo de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Modelado del Sistema Neumático en los Biorreactores de Inmersión
Temporal.**

Autor: Daymí Domínguez González

E-mail: daymi@uclv.edu.cu

Tutor(es): Msc. Alberto Gómez Abreu

Prof. Auxiliar, Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila

E-mail: agomez@bioplasmas.cu

Dr. Angel Ernesto Rubio Rodríguez

Prof. Auxiliar. Departamento: Automática y Sistemas Computacionales.

Facultad de Ing. Eléctrica. UCLV

E-mail: erubio@uclv.edu.cu

Consultante: Francisco Herrera Fernández

E-mail: herrera@uclv.edu.cu

Santa Clara, 2009

"Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

**Mas gracias sean dadas a Dios, que nos da la victoria por medio de nuestro Señor
Jesucristo.**

1 Cor. 15:57

DEDICATORIA

A mis padres:

Juan Darnel Domínguez García

Giselda González Hernández

A mi hija:

Helen Vázquez Domínguez

A mi hermana:

Daily Domínguez González

A mis abuelos maternos:

Delia Hernández Machado (Hoy no está entre nosotros).

Ángel González Gómez

A mi señor Jesucristo porque a él debo todo lo que soy.

AGRADECIMIENTOS

No quiero cometer el gran pecado de omitir a alguien en esta sección, aunque eso sea una labor muy difícil. Ya que de una u otra forma cada una contribuyó durante la realización de este trabajo.

Agradezco a Dios, por ser mi luz y estar presente en cada momento de mi vida. A mis padres por sus esfuerzos, consejos y dedicación, que de no ser así no hubiese sido posible llegar hasta el final, gracias por ser tan buenos padres. A mi hermana por ser tan comprensiva y darme siempre tanto amor. A mi hija por ser tan paciente y cariñosa. A mis tutores Alberto Gómez Abreu y Angel Ernesto Rubio Rodríguez quienes me ayudaron mucho en la realización de este proyecto, realmente son personas que admiro y estimo porque me inspiran voluntad e inteligencia. Gracias les doy por haberme concedido la oportunidad de trabajar bajo sus guías. A Cosme. E Santiesteban Toca y Milton García Borroto, a quienes considero admirables líderes. Gracias por el apoyo incondicional que me han brindado y por sus enseñanzas. A mi Abuela materna por estar pendiente de cada uno de los momentos de mi vida y por sus preocupaciones, es una lástima que hoy no se encuentre en este mundo pero sé que en estos momentos se regocija de todo lo que he logrado. Debo también agradecer a mis compañeros de estudio por vivir juntos tantos momentos inolvidables en estos últimos dos años de estudio, por su colaboración, y ayuda brindada. A todo el personal del Centro de Bioplantas de la universidad de Ciego de Ávila y en especial al colectivo del laboratorio de Informática Aplicada. Quiero manifestar mi agradecimiento a los profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica por contribuir en mi educación y formación. De manera especial agradezco a Francisco Herrera Fernández por el apoyo recibido y por sus acertados comentarios los cuales contribuyeron a enriquecer este trabajo. A la Revolución, y a sus líderes porque han sido más que guías en mi formación como cubano, revolucionario, profesional y persona.

TAREA TÉCNICA

Se han realizado una serie de tareas que permiten la obtención del modelo del sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal regido por una secuencia de pasos para lograr una mejor comprensión de los resultados logrados.

1. Análisis de los Biorreactores de Inmersión Temporal.
2. Cálculo del modelo neumático de los Biorreactores de Inmersión Temporal del Laboratorio de Células del Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila.
3. Programación en MATLAB del modelo neumático de los Biorreactores de Inmersión Temporal del Laboratorio de Células del Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila.
4. Simulación mediante el MATLAB del modelo neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal del Laboratorio de Células del Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila.
5. Validación del modelo neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal del Laboratorio de Células del Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila.
6. Elaboración del trabajo de diploma

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

RESUMEN

La micropropagación de plantas es el sector de mercado más atractivo para los laboratorios comerciales que aplican las tecnologías del cultivo in vitro de especies vegetales. Ésta, requiere la transferencia periódica del cultivo a medio fresco debido al agotamiento y/o alteración de los nutrientes, así como, al crecimiento o proliferación continuado del tejido. El “SmartBIT” es producto de la evolución de las anteriores generaciones de estos biorreactores convirtiéndolo en la cuarta generación. Con este proyecto, se pretende contribuir al desarrollo de la obtención del modelo neumático general del SmartBIT, que permitirá la implementación del lazo de control de los Biorreactores de Inmersión Temporal, para lograr una producción en serie de vitroplantas, de buena calidad y con una homogeneidad que les permita adaptarse a las condiciones ex vitro uniformemente y tener un alto índice de supervivencia, dando respuesta a las demandas y necesidades de la agricultura cubana, logrando una disminución de importaciones.

La utilización de esta herramienta les permitirá a los investigadores la obtención del modelo general de los Biorreactores de Inmersión Temporal, y así se podrá implementar la estrategia de control óptima de acuerdo al tipo de cultivo y al protocolo establecido.

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	ii
TAREA TÉCNICA.....	iii
RESUMEN.....	v
INTRODUCCION.....	1
Organización del informe.....	4
CAPITULO1 Estado del arte del Modelado del Sistema Neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal.....	5
Introducción al capítulo.....	5
1.1 El proceso de Micropropagación invitro.....	6
1.1.1 Situación del proceso de micropropagación invitro en la actualidad.....	6
1.1.2 La micropropagación, una técnica para el cultivo de las plantas.....	7
1.1.3 Ventajas y desventajas de la micropropagación en los Biorreactores de Inmersión Temporal.....	7
1.2 Automatización en los Sistemas de Inmersión Temporal.....	9
1.2.1 Evolución de la automatización en los Biorreactores de Inmersión Temporal.....	10
1.2.2 Generaciones.....	12

1.2.2.1 Primera generación de BIT.....	12
1.2.2.2 Segunda generación de BIT.....	13
1.2.2.3 Tercera generación de BIT.....	13
1.2.2.4 Cuarta generación de BIT.....	14
1.3 Modelado en los Sistemas de Inmersión Temporal.....	14
1.3.1 Identificación de sistemas.....	14
1.3.2 Modelado de sistemas.....	16
1.3.2.1 Modelado analítico... ..	17
1.3.2.1a) Modelado analítico de los actuadores electro-neumáticos.....	17
1.3.2.2 Modelos lineales y no lineales.....	17
1.3.2.3 Modelo de la válvula.....	19
1.3.2.4 Dinámica de las presiones.....	21
1.4 Conclusiones parciales.....	22
CAPITULO 2: Modelado y Simulación del Sistema Neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal.....	23
Introducción al capítulo.....	23
2.1 Descripción del proceso de llenado y vaciado de los frascos.....	23
2.1.1 Fluidos compresibles e incompresibles.....	24
2.1.2 Condiciones iniciales del proceso.....	24
2.1.3 Cálculo de las variables para el frasco de medio en el proceso de llenado.....	27
2.2 Cálculo de la presión de aire mediante la ecuación de los gases.....	33
2.2.1 Cálculo de la presión en el fondo del frasco de medio.....	34
2.3 Cálculo de la variables para el frasco de vitroplantas en el proceso de llenado.....	35
2.3.1 Cálculo de la presión en el fondo del frasco de vitroplantas.....	38
2.4 Cálculo de la altura real del líquido (Murashige).....	38

2.5 Proceso de vaciado.....	41
2.6 Conclusiones del capítulo.....	43
CAPITULO 3: Análisis y discusión de los resultados.....	44
Introducción al capítulo.....	44
3.1 Validación de los resultados obtenidos.....	44
3.1.1Análisis de la altura del líquido en ambos frascos.....	45
3.2 Estudio de factibilidad.....	54
3.3Análisis viable del proyecto.....	55
3.4Conclusiones del capítulo.....	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	59
ANEXOS.....	61
Anexo I. Frascos de cultivo.....	61
Anexo II. Modelo de la válvula.....	62
Anexo III. Válvula tipo SMC SY5420-5DZ-01F.....	63
Anexo IV. Información Técnica del Catálogo SMC.....	64
Anexo V. Tabla de especificaciones de los componentes utilizados.....	66

INTRODUCCIÓN

La micropropagación de plantas es el sector de mercado más atractivo para los laboratorios comerciales que aplican las tecnologías del cultivo in vitro de especies vegetales. Ésta, requiere la transferencia periódica del cultivo a medio fresco debido al agotamiento y/o alteración de los nutrientes, así como, al crecimiento o proliferación continuado del tejido.

El uso del medio líquido para la propagación in vitro tiene algunas ventajas y se considera una técnica ideal para la propagación masiva de plantas, porque reduce la manipulación y es un requisito indispensable para la automatización del proceso.

En Cuba, a partir del desarrollo del primer sistema semiautomatizado de inmersión temporal (BIT[®]) en 1997, por investigadores del Centro de Bioplantas, se han realizado investigaciones sobre la aplicación de esta técnica en la proliferación de meristemos de varias especies de interés agrícola, ornamental y forestal, tales como caña de azúcar, para la producción de microtubérculos de papa, la micropropagación de piña, entre otros.

El BIT, específicamente, tiene dos posibilidades de aplicación: para la obtención de explantes y su ulterior proliferación en frascos convencionales de la micropropagación o para la obtención de brotes aptos para el enraizamiento ex vitro y la aclimatización.

A lo largo de la evolución de los experimentos con los Biorreactores ha sido una constante preocupación la dependencia del conocimiento de la tecnología de automatización por parte de los investigadores, su falta de flexibilidad, de escalabilidad, así como la no amigable interfaz de programación de los autómatas (PLC), incluso para especialistas en la materia, la que ha limitado la realización de nuevos y más complejos y completos experimentos. Hasta el momento el Centro de Bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila contenía dentro de las investigaciones de los Biorreactores de Inmersión Temporal una problemática

debido a que no se había logrado modelar el sistema neumático. Este modelado es de vital importancia para conocer profundamente el comportamiento de las curvas experimentales en el proceso de llenado y vaciado. No obstante el desconocimiento de este modelo neumático les impide investigadores del centro de Bioplasmas obtener el modelo neumático general.

Situación del problema:

En la actualidad no existe el Modelado del Sistema Neumático del SmartBIT®, esto impide a los investigadores la obtención de su modelo neumático general, que representará el comportamiento biológico que ocurre en los Biorreactores de Inmersión Temporal, el cual se utilizará para el control de las variables físico biológicas que permitirá la obtención de una planta con mayor calidad. Además posibilita validar los resultados del modelo de forma experimental que hasta el momento se desconocía su comportamiento.

Problema Científico:

No existe el modelado del sistema neumático del SmartBIT®, que permita a los investigadores biólogos y productores obtener su modelo neumático general en el laboratorio de células del centro de BIOPLANTAS de la Universidad de Ciego de Ávila.

Objeto de estudio:

Modelado del Sistema Neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal.

Campo de acción de la investigación:

Diseño y Simulación del Sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal.

Objetivo General:

Modelar el Sistema neumático del SmartBIT®, teniendo en cuenta los métodos clásicos de modelado de procesos, que permita a los investigadores biólogos y productores obtener su modelo neumático general, en el laboratorio de células del Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila.

Objetivos específicos del trabajo

1. Diseñar el modelo neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal del laboratorio de células del Centro de Bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila.
2. Modelar el sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal del laboratorio de células del Centro de Bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila.
3. Simular el modelo neumático de los Biorreactores de Inmersión Temporal del laboratorio de células del Centro de Bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila.
4. Validar el modelo neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal del laboratorio de células del Centro de Bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila.

Hipótesis:

El Modelado del Sistema Neumático del SmartBIT® permitirá a los investigadores biólogos y productores obtener su modelo neumático general que aportará máxima eficiencia y calidad en la planta en el mínimo espacio de tiempo.

Interrogante Científica

Si se realiza el modelado del sistema neumático del SmartBIT®, utilizando los métodos clásicos de modelado de procesos, entonces permitirá a los investigadores obtener su modelo neumático general, en el laboratorio de células del Centro de Bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila.

Novedad Científica:

Lo novedoso de este trabajo es que hasta el momento no se había obtenido el modelo neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal, ni en Cuba ni en ningún país del

mundo, lo cual proporciona la obtención de un modelo general que permita a los investigadores biólogos y productores lograr una planta con mayor calidad.

Aporte:

Como **aporte** se puede mencionar la obtención del modelo neumático. Este aporte es desde el punto de vista **teórico** pues muestra el comportamiento analítico del nivel en ambos frascos, para finalmente compararlo con el comportamiento en tiempo real y demostrar la veracidad del modelo.

Organización del informe:

En el capítulo uno, se analizan los Biorreactores de Inmersión Temporal en su totalidad para conocer todos los aspectos a llevar a cabo para el Modelado del Sistema Neumático. Se realiza un estudio minucioso de la ecuación de la válvula así como la dinámica de las presiones, y modelado de sistemas para obtener el modelo neumático en Biorreactores que en un final es el objetivo a lograr.

En el capítulo dos, se va a realizar el cálculo, la programación y simulación con la utilización del MATLAB del modelo para lograr todos los resultados deseados mostrándolos en el diagrama de bloques para su posterior análisis y validación.

En el capítulo tres, se realiza el análisis de situación actual de los Biorreactores de Inmersión Temporal y se busca lograr todo lo propuesto anteriormente y ver que nuestro diseño e implementación cumplan con los requerimientos necesarios para el funcionamiento eficiente que muestra este diagrama de bloques, además con la validación quedará demostrado que el error entre las curvas experimentales y el modelo propuesto resultará muy pequeño dando como justificación la veracidad de este trabajo.

CAPÍTULO 1.

Estado del arte del Modelado del Sistema Neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal.

1. Introducción al capítulo

Es importante conocer todo los avances que se han obtenido en los Sistemas de Inmersión Temporal a lo largo de las investigaciones para llegar al punto de porqué es esencial el modelado del sistema neumático y el entendimiento pleno de la evolución *in vitro* de la plantas. Conociendo la transferencia del líquido (concentración de *Murashige-skoog*) del frasco de medio al frasco de cultivo mediante un modelo neumático nos daría el tiempo exacto en que esto ocurre y como se van nutriendo la plantas hasta el punto de conocer el crecimiento y desarrollo de las plantas. No obstante en investigaciones posteriores se podría llegar a la interpretación de la variación del líquido debido a la nutrición de las plantas, cómo varía la concentración del *Murashige-skoog*, y finalmente saber cuántos frascos se pueden conectar en dicho estante y la diversidad de frascos. A continuación se va rememorar un poco de historia sobre los biorreactores, la semiautomatización y la importancia de la micropropagación *in vitro* de las plantas. También se dará una breve referencia bibliográfica acerca de la variación y evolución de las plantas, de los diferentes modelados y simulaciones que se han obtenido para llegar a la importancia y novedad del proyecto. Este trabajo abre las puertas a próximas investigaciones y tiene presente que es la primera vez que se modela el Sistema Neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal en el Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila.

1.1.- El Proceso de Micropropagación In vitro.

Profundizando en el mundo de la micropropagación o del también llamado cultivo de células, se enfatiza en el estudio de los principales procesos que ocurren en las plantas y que más importancia tienen para el mantenimiento de la vida, así como el efecto que logran sobre los mismos, las condiciones ambientales. Para comprender estos procesos se hace una explicación de los fenómenos que ocurren en las plantas en general y los factores que influyen en ellos.

1.1.1. - Situación del proceso de micropropagación in vitro en la actualidad.

En los procedimientos de cultivo descritos hasta la década de los ochenta, no se hace ninguna referencia al control ambiental en el desarrollo de las plantas *in vitro*. Sin embargo, las tasas de crecimiento, desarrollo y muchas de las características fisiológicas y morfológicas de las plantas formadas *in vitro* están influenciadas por el ambiente físico, químico y gaseoso de los frascos de cultivo. Junto a estas condiciones ambientales tenemos la composición del medio de cultivo el cual es fundamental para el comportamiento de las vitroplantas en su crecimiento.

La investigación y el desarrollo de tecnologías vinculadas al cultivo *in vitro* han sido guiados para resolver la contaminación en los frascos de cultivo, uno de los grandes problemas ligados a la micropropagación. Este problema se ha resuelto con la utilización de robot industriales, que actuando en las primeras etapas, logran mantener un medio aséptico por un mayor tiempo, ya que evitan la acción del hombre. Para que haya un buen funcionamiento de la robótica es muy importante el desarrollo alcanzado en el tratamiento de imágenes ya que el robot es el encargado de realizar cortes y trasplantes con completa autonomía (Cazzulino, Pedersen et al. 1991);(Fujita and Kinase 1991);(Gupta, Timmis et al. 1991). Es a partir de finales de la década de los ochenta y hasta la actualidad que se han realizado investigaciones con vista a describir el impacto de las condiciones físicas, químicas, gaseosas y del medio de cultivo en el crecimiento y desarrollo de las vitroplantas.

Se han hecho estudios sobre la temperatura, la influencia de la luz teniendo en cuenta la Densidad del flujo de fotones fotosintéticamente activo (FFF) (El flujo de fotones fotosintéticamente activo es el que se encuentra entre 400 y 700 nm de longitud de onda)

(González 2004), ciclos de iluminación, distribución del espectro de iluminación y la dirección de incidencia de los rayos de luz, la composición gaseosa teniendo en cuenta las concentraciones de CO₂, O₂, C₂H₄, la humedad relativa, el flujo de aire, la presión y el potencial hídrico. También se sabe de la importancia de la composición orgánica e inorgánica como azúcares, reguladores del crecimiento, reguladores del potencial osmótico, pH, O₂ y CO₂ disuelto y microorganismos del medio de cultivo(Kirdmanee, Kitaya et al. 1995);(Kitaya, Shibuya et al. 1998)

1.1.2.- La micropropagación, una técnica para el cultivo de plantas.

El cultivo de tejidos vegetales o cultivo *in vitro* de tejidos vegetales, es una técnica de reproducción en condiciones totalmente asépticas, en la que a partir de un pequeño segmento inicial de tejido es posible regenerar en poco tiempo miles o millones de plantas genéticamente iguales a la planta madre, cuando a este tejido le es aplicado un estímulo por medio de variables físicas y químicas controladas en un medio de cultivo(JC.Aceves and Hernández 1997)

La Micropropagación es una biotecnología que se aplica a especies vegetales con el fin de obtener una población en el menor período de tiempo posible. Muchas veces es sinónimo de cultivo de tejidos.

1.1.3 Las ventajas y desventajas de la micropropagación en los Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®)

Las numerosas ventajas que presentan los Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®), con respecto a los métodos convencionales de la micropropagación son reconocidas a nivel mundial.

Ventajas:

- Con este método se logra utilizar un medio líquido, reduciendo así los costos de producción y mejorando la automatización.(Aitken-Christie 1991)
- Se reduce el área de trabajo
- Se disminuye la cantidad de trabajo
- Se utiliza menor cantidad de vasijas

- Se obtiene más rendimiento
- A pesar de los inconvenientes, la micropropagación en los Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®), es una forma viable para dar solución a las necesidades actuales.

Desventajas:

Por la alta humedad relativa en los frascos, las plántulas no necesitan restringir el intercambio de gases trayendo como consecuencia el retraso en el crecimiento de la cutícula y de las ceras epicuticulares.

Estomas redondos en lugar de ser elípticos, levantados con respecto a la epidermis y con paredes más finas lo que explica su incapacidad para cerrarse bajo condiciones que normalmente lo provocarían.

Presencia de cloroplastos achatados y desprovistos de almidón en algunas especies.

El contenido de clorofila es variable y depende de la FFF. En general las plántulas presentan un contenido total de clorofila semejante al de las plantas *ex vitro* bajo similares FFF, pero debido a la poca funcionalidad de las mismas al ser llevada las plántulas a condiciones *ex vitro* solo muy pocas realizan su función biológica.

Existe carencia de tejidos vascular funcional, con pobre conexión entre el tallo y el sistema radical lo que frecuentemente restringe la toma de agua. Las raíces contienen granos de almidón, abundantes espacios intercelulares y son generalmente hipertróficas con una longitud muy grande y tejido vascular primario; mientras que las células de las raíces *ex vitro* presentan células más uniformes y compactas, con tejidos vasculares primarios y secundarios.

A causa de la hiperhidratación se producen desórdenes morfológicos y un crecimiento distorsionado. Se afecta además la fotosíntesis, la transpiración y el intercambio de CO₂ y O₂, procesos de gran importancia para la calidad y supervivencia de las vitroplantas.

Las plantas realizan escasa fotosíntesis producto de la baja concentración de CO₂ durante la incidencia de la luz en los frascos de cultivo cerrados.

Escaso transporte de nutrientes y de agua debido a la gran humedad relativa en los frascos de cultivo(Sagawa and Kunisaki 1990b)).

1.2.- La automatización en los Sistemas de Inmersión Temporal

Cuando se habla de automatización en los Sistemas de Inmersión Temporal realmente debemos hablar del término semiautomatización, pues inevitablemente lleva la acción de la mano del hombre en el desarrollo del Proceso de Inmersión Temporal, aunque en lo adelante continuaremos hablando del término de automatización

La frecuencia de inmersión es lo que identifica al Ciclo de Inmersión Temporal constituyendo el parámetro que más peso tiene para que el sistema funcione eficientemente, y su control evita el fenómeno de la hiperhidricidad que es frecuente y afecta seriamente durante el cultivo en medios líquidos.

Harris y Mason en 1983 fueron los primeros en lograr un Sistema de Inmersión Temporal elementalmente automatizado con su máquina de inclinación de frascos, más tarde Tisserat y Vandercook en 1985 desarrollaron el Sistema de Cultivo de Plantas Automatizado (APCS, por sus siglas en inglés).

Aitken–Christie y Jones (1987) y Aitken–Christie y Davies (1988) utilizaron un sistema, en el cual, basándose en bombas peristálticas, agregaron y extrajeron periódicamente el líquido, también Simonton y otros en 1991 utilizaron un sistema muy parecido con bombas controladas por computadora para establecer la frecuencia de baño.

Ya en 1995 Teisson y Alvarado desarrollaron uno de los más actuales Sistemas de Inmersión Temporal, el Recipiente para Inmersión Temporal Automatizada (RITA®)

Entre 1997 y 1998, Maritza Escalona y equipo, desarrollaron el Biorreactor de Inmersión Temporal (BIT®), el más actual que conocemos, que lo forman dos frascos interconectados, por mangueras, donde el aire a presión hace pasar el medio líquido de un frasco al otro donde están las plántulas y luego es retirado nuevamente al frasco anterior.

Un Biorreactor de Inmersión Temporal (BIT®), invariablemente, estará compuesto de dos frascos gemelos con capacidad, uno para medio líquido y otro para las vitroplantas.



Figura1.1: Biorreactor de Inmersión Temporal (BIT®)

1.2.1.- Evolución de la automatización de los Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®).

Los sistemas de inmersión temporal se pueden agrupar en cuatro categorías fundamentales teniendo en cuenta su modo de operación.

1. Máquinas de inclinación y mecedoras.
2. Inmersión completa con mecanismo de renovación del medio nutriente.
3. Inmersión parcial con mecanismo de renovación del líquido nutriente.
4. Inmersión completa con transferencia neumática del líquido nutriente y sin reposición del medio.

La Inmersión completa con transferencia neumática del líquido nutriente y sin reposición del medio tiene dos formas sobresalientes, el Recipiente para Inmersión Temporal Automatizada (RITA®) y el Biorreactor de Inmersión Temporal (BIT®). Ambos han utilizado para la automatización de procesos como la organogénesis y la embriogénesis, los cuales aumentan las tasas de multiplicación y con manejos adecuados para cada especie se reduce la hiperhidratación.

Para el caso del Recipiente para Inmersión Temporal Automatizada (RITA®), que se muestra en la figura 1.2 y consiste en un frasco con dos cavidades que se comunican, en la parte superior se colocan los explantes y en la inferior el medio líquido, que será subido a la cámara superior con aire a presión y ahí se mantendrá burbujeando hasta que cese el bombeo.

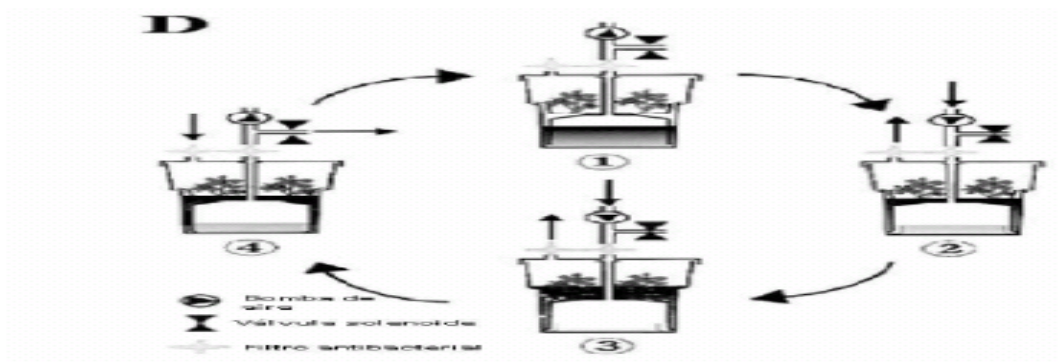


Figura 1.2: Recipiente para Inmersión Temporal Automatizada (RITA®)

En cuanto a los Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT) que es el que utilizamos en esta investigación que lo forman dos frascos interconectados (ver figura 1.3), por mangueras, donde el aire a presión hace pasar el medio líquido de un frasco al otro donde están las plántulas y luego es retirado nuevamente al frasco anterior.

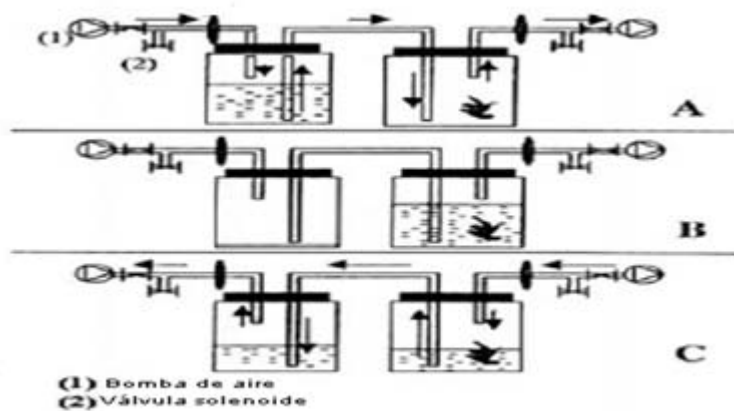


Figura 1.3: Biorreactor de Inmersión Temporal (BIT®) desarrollado en el centro de bioplantas de la Universidad de Ciego de Ávila, Cuba, por Maritza Escalona y otros.

Como muestra la figura 1.3 A, por mangueras de silicona (1), con válvula solenoide (2), que posibilitan el paso del aire a presión, intercalados, entra el aire a presión y el medio de cultivo pasa al recipiente de las plántulas. De igual forma sucede el proceso inverso, en la figura 1 C, que entra el aire a presión y el medio de cultivo regresa a su frasco.

La figura 1.4 muestra la exactitud del ciclo de inmersión para proporcionar a las plantas una nutrición sana y sin exceso de nutrientes.



Figura 1.4: Ciclo de nutrición de las plantas

Es válido tener en cuenta que el proceso para el paso del líquido del frasco de medio al frasco de vitropantas dura cuatro minutos cada tres horas debido a que la transferencia de líquido ocurre en aproximadamente 70 segundos y luego se mantiene en inmersión para el proceso de nutrición de las plantas pasando en 70 segundos a su estado inicial. Este proceso demora en repetir el ciclo tres horas para que la planta sea capaz de asimilar los nutrientes adquiridos en el ciclo anterior.

1.2.2. Generaciones

En solo 10 años de desarrollo investigativo, referente a los BITs, ya existen elementos suficientes para considerar que se han realizado cuatro generaciones de los mismos.

1.2.2.1.- Primera generación de B.I.T

Los Biorreactores de Inmersión Temporal diseñados por Escalona y colaboradores entre 1997 y 1998, contaban con rudimentos de automática, electro válvulas poco eficientes y tuberías de aire, ubicándose este en la cuarta categoría dentro de la automatización de los Sistemas de Inmersión Temporal y siendo estos la primera generación de Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®).

1.2.2.2.- Segunda generación de B.I.T

Más adelante en el año 1999 se introducen los pequeños Controladores Lógicos Programables (PLC), que le daban una mayor fiabilidad y robustez al Proceso de Inmersión Temporal, aunque con un repertorio de instrucciones muy limitado, pero con electro válvulas más eficientes, manteniéndose las tuberías de aire; pudiendo considerar éstos como la segunda generación de Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®).

Posteriormente con el desarrollo de las necesidades de los investigadores, de variar variables físicas como el CO₂, en el año 2003 se utiliza un pequeño Controlador Lógico Programable (PLC), de un poco más de líneas de instrucción, pero aún limitado, pero se introducen electro válvulas compactas de alta eficiencia y capacidad de operación, con un diseño de mangueras, racores y reguladores de presión, que lograba que el sistema fuera más flexible, más fiable y más robusto, considerado estos como la segunda versión de la segunda generación de Birreactores de Inmersión Temporal (BIT®).

1.2.2.3.- Tercera generación de B.I.T

Con el desarrollo y resultados de los nuevos experimentos, en el año 2004 se introducen nuevos conceptos en el tema de la automatización, la utilización de los Dispositivos de Control de Procesos (PCD), estos dispositivos los utiliza *Global Technology* para definir todo el conjunto de equipos, software y protocolos para lograr integrabilidad en los Sistemas de Control de Procesos con funciones internas de control, con posibilidad de un gran números de líneas de programación que permitieran la programación de los experimentos planteados por los investigadores, con la posibilidad de acoplarse a una Computadora Personal (PC) para su programación, más fácil y amigable, además de su capacidad de trabajar en red utilizando los estándares internacionales, que lograba que el sistema fuera más flexible, intercambiable, más fiable y robusto, considerado éstos como la tercera generación de Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®).

1.2.2.4.- Cuarta generación de B.I.T

Dado el alto grado de posibilidades que nos ofrecían los Dispositivos de Control de Procesos (PCD), con funciones internas de control, con posibilidad de un gran número de líneas de programación, con la capacidad de trabajar en red y acoplarse a una Computadora Personal (PC). En el 2007, aparece esta nueva propuesta llamada SmartBIT®, Biorreactor de cuarta Generación, con Dispositivos de Control de Procesos (PCD) capaces de asimilar infinitudes de funciones, con una gran intercambiabilidad, modularidad y estandarización, acoplados ahora a una Computadora Personal (PC), en la cual corre un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), constituyendo una nueva generación de Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT®), a partir del empleo de la automatización a todos los niveles que permita a investigadores y productores realizar la parametrización de los PCD y el monitoreo en tiempo real del proceso en los BIT, de forma sencilla y eficiente, apareciendo ya la toma de decisiones tanto a nivel de campo como a nivel superior.

1.3.-Modelo Neumático en los Sistemas de Inmersión Temporal.

Se puede plantear que hasta el momento no se había llegado a modelar el sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal pero al menos se pudo hacer un estudio del modelado e identificación de diferentes sistemas para recurrir finalmente a la posibilidad de utilizar algunos conceptos que se asemejan y son de utilidad para la obtención de dicho modelo utilizado en los procesos de Inmersión Temporal y obtener el modelo general que necesitan los investigadores biólogos y productores del centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Ávila para verificar la eficiencia del experimento que representa la evolución de las plantas.

1.3.1-Identificación de sistemas

El método más apropiado para representar la conducta de un proceso es plasmar su comportamiento en una representación matemática. El problema de determinar un modelo matemático de un sistema dinámico desconocido (*sistema objetivo*) a partir de datos medidos de entrada-salida, es generalmente referido como *Identificación de Sistemas*

(Eykhoff 1981; Forssell 1999; Ljung 1999). Los propósitos de la identificación de sistemas son múltiples: predecir el comportamiento del sistema, explicar las interacciones y relaciones entre entradas y salidas de un sistema etc. Además, en los últimos años ha tomado gran auge la simulación de sistemas en computadora, para lo que se necesita un modelo.

Como un campo separado, la identificación de sistemas comienza su desarrollo en los años '60 con el impulso dado por trabajos encabezados por Kalman y Aström y colaboradores (Kalman 1960; Kalman 1964; Aström and Bohlin 1965). Desde entonces, el campo de la identificación de sistemas ha experimentado un rápido crecimiento y en nuestros días es un área de investigación bien establecida.

Existen varias formas de construir modelos matemáticos de procesos. Si las leyes físicas que gobiernan el comportamiento del sistema son conocidas se puede entonces construir los llamados *modelos de caja-blanca*. En este tipo de modelos todos los parámetros y variables pueden interpretarse en términos de entidades físicas y todas las constantes son conocidas a priori. En la otra punta de la escala se encuentran los *modelos de caja negra*. Estos modelos son contruidos tomando en cuenta solamente los datos, sin usar conocimiento físico o verbal del sistema y los parámetros son simplemente valores que pueden sintonizarse para optimizar el modelo obtenido. Con frecuencia, los modelos de caja negra son muy eficientes para el modelado de sistemas dinámicos y requieren menos tiempo de ingeniería para su construcción que los modelos de caja blanca. Entre ambos límites de la escala se encuentran los *modelos de caja gris* en los que se utiliza cierto conocimiento previo del proceso y el resto del conocimiento se extrae de los datos de entrada-salida del mismo.

El problema de la identificación de sistemas puede ser dividido en varios subproblemas:

- (I) Diseño de experimentos.
- (II) Recogida de datos.
- (III) Selección de la estructura del modelo.
- (IV) Estimación de parámetros del modelo.
- (V) Validación del modelo.

El diseño de experimentos implica cuestiones como la elección de qué señales medir, del tiempo de muestreo y de las señales de excitación. Una vez que estos aspectos han sido resueltos, el verdadero experimento de identificación puede ejecutarse y los datos del proceso son recogidos. El próximo problema es decidir una estructura del modelo conveniente. Este es un paso crucial en el proceso de identificación y para obtener un modelo útil y bueno, este paso debe hacerse con cuidado. Contando con una adecuada estructura del modelo y con los datos medidos, se pasa a la estimación de los parámetros del modelo, para lo cual existen infinidad de algoritmos eficientes (Jiménez 2007). .

Un modelo satisfactorio debe cumplir dos requerimientos contradictorios: debe ser lo suficientemente detallado como para representar al sistema real con exactitud y a su vez, lo suficientemente sencillo como para permitir un análisis matemático práctico. Por tanto, una vez que se tiene la representación matemática del proceso, se compara el comportamiento del sistema físico con el del modelo matemático. Si el comportamiento del sistema objetivo y el modelo matemático son similares, se dice que bajo las condiciones del experimento, se tiene un modelo del proceso. Generalmente, las herramientas de validación comunes usan “datos frescos” para comparar la salida del modelo con la salida medida (validación cruzada). Si el modelo falla al pasar la prueba de validación, todos o algunos de los pasos anteriores deberán iterarse hasta que un modelo validado se obtenga.

1.3.2-Modelado de sistemas.

En simuladores de diseño, dado que los resultados que se esperan obtener del Simulador son guías para mejorar el funcionamiento del sistema, será necesario generar un modelo del sistema que sea lo más completo posible, incluso penalizando el funcionamiento del simulador en términos de tiempo de proceso. Además será de gran importancia el desarrollo de salidas de resultados que permitan analizar de manera rápida y detallada el funcionamiento del modelo y los cambios producidos por las modificaciones bajo estudio. Sin embargo, en otros tipos de simuladores, tal como los simuladores orientados a la formación, el primer requisito es el funcionamiento en tiempo real. Es necesario plantear que el comportamiento de los modelos en términos de tiempo de uso del procesador tiene una gran importancia. En este tipo de simuladores no se busca un

comportamiento del modelo del sistema correcto en todos los campos o que sirva para estudiar modificaciones del sistema, sino un comportamiento correcto de cara al personal que está recibiendo formación.

1.3.2.1- Modelado analítico.

En el presente trabajo el modelado analítico es un factor importante a analizar debido a que refleja cómo se comportan todos los componentes y variables en el proceso, logrando ajustar todos los datos al posible modelo de forma tal que su funcionamiento y comportamiento sea muy similar al del experimento montado, dando paso a la obtención de la variación de la altura del líquido (*Murashige-skoog*) que es nuestra meta a seguir. Un ejemplo de modelo analítico es el que se muestra a continuación:

1.3.2.1. a- Modelado analítico de los actuadores electro-neumáticos.

Los actuadores electro-neumáticos están formados por un cilindro neumático, al cual se le acopla directamente la carga, y una o varias válvulas electro-neumáticas conectadas a las cámaras del cilindro. Para la modelación de los actuadores suelen dividirse en tres subsistemas:

- Modelo de la válvula: Contempla la dinámica del flujo de aire a través de la válvula en función de la acción de control y las presiones en sus extremos.

- Modelo del actuador: Contempla la dinámica de las presiones en las cámaras del cilindro en función del flujo de aire y los volúmenes de las cámaras del cilindro, así como sus variaciones. Estos dos últimos parámetros quedan definidos por la posición y velocidad del émbolo (y, por tanto, de la carga) si se conoce el área de sus dos caras.

- Modelo de la carga: Contempla la dinámica del movimiento de la carga en función de las presiones aplicadas a cada lado del émbolo y las fuerzas externas y de fricción que estén presentes en la estructura mecánica.

1.3.2.2-Modelos lineales y no lineales

El primer trabajo reconocido, en el campo del modelado de actuadores neumáticos, fue publicado por J. L. Shearer en 1956(Shearer 1956) . En este artículo Shearer desarrolla, por linealización aproximada, el modelo dinámico lineal de un actuador neumático de doble

vástago para pequeños movimientos alrededor del centro del cilindro. También presenta un modelo teórico para el flujo másico de aire a través de una válvula proporcional y lo verifica experimentalmente. Posteriormente, muchos autores han adoptado las ideas expuestas por Shearer para el desarrollo de modelos más complejos. Un ejemplo de esto puede verse en (Burrows 1972). En este libro, Burrows expone en detalles la obtención del modelo dinámico lineal para un actuador electro-neumático y hace las siguientes consideraciones: el gas es ideal y los cambios de estado son adiabáticos; los cambios de temperatura en las cámaras del cilindro son despreciables, sólo existe fricción viscosa y es constante, el punto de operación es el centro del cilindro; y, por último, el flujo másico a través de la válvula se considera en función de la posición del carrete de la válvula y la presión en el cilindro. Como resultado se obtiene el modelo dinámico de la posición de la carga en función de la acción de control, que resulta de tercer orden tipo uno y sin ceros.

No obstante, las no linealidades presentes en los actuadores electro-neumáticos son demasiado fuertes para dejar de tenerlas en cuenta, especialmente las asociadas al hecho de que los volúmenes de las cámaras del cilindro varían en función de la posición de la carga. Estos fenómenos pueden contemplarse en modelos no lineales. Uno muy completo lo desarrolla Richer en (Richer and Hurmuzlu 2000). En este modelo, además de tener en cuenta la dinámica del flujo de aire, la dinámica de las presiones en el cilindro y la dinámica del movimiento de la carga, también se consideran las fugas de aire entre las cámaras, la dinámica de la válvula y la geometría de su orificio, la dinámica y el retardo de tiempo que introducen las tuberías, y otros detalles. Richer determina los parámetros de su modelo, el cual valida prácticamente por una serie de experimentos que explica en su artículo (Richer and Hurmuzlu 2000) .

Para la síntesis de muchas estrategias de control es necesario contar con el modelo lineal de la planta, por lo que se impone linealizar los modelos de los actuadores electro-neumáticos, pero evitando perder los efectos de sus no linealidades. Para ello es común que se emplee el método de linealización extendida, propuesto por W. Rugh (Rugh 1984), que permite obtener el modelo lineal para un punto de operación genérico. Aplicando este método a los actuadores electro-neumáticos, se obtienen modelos lineales con coeficientes determinados por la posición del émbolo del cilindro. En este sentido, Belgharbi expone un modelo

analítico para el flujo a través de una válvula proporcional y propone una aproximación polinomial del mismo (Belgharbi, Thomasset et al. 1999) . Luego Brun en (Brun, Belgharbi et al. 2000) expone el modelo no lineal de un actuador electro-neumático con el flujo de aire según el modelo de Belgharbi y lo linealiza. Obtiene como resultado un modelo lineal en espacio de estado de cuarto orden con coeficientes en función de la posición de la carga. Ese modelo de cuarto orden es reducido a uno de tercer orden, promediando las constantes de tiempo asociadas a la variación de los volúmenes en cada cámara del cilindro, y con este último sintetiza diversas estrategias de control.

Por su parte, Janiszowski presenta la linealización del modelo teniendo en cuenta el retardo introducido por las tuberías cuando son considerablemente largas (Janiszowski 2004). Obtiene así, para la velocidad, un modelo de segundo orden con retardo de tiempo, cuyos coeficientes dependen de la posición del émbolo en el cilindro. En este modelo, si se compara con el de Brun, puede notarse que no aparecen consideradas las constantes de tiempo asociadas a las cámaras del cilindro (Rubio 2008).

Sin embargo, en el trabajo de Karpenko puede verse la linealización del modelo sin promediar ninguno de sus parámetros. Como resultado obtiene un modelo de quinto orden (teniendo en cuenta la dinámica de la válvula) con un cero. Los coeficientes de este modelo dependen de los volúmenes de las cámaras del cilindro (Karpenko and Sepehri 2006).

Esta explicación detallada de la linerización del modelo de los actuadores electro-neumáticos es un factor que influye en el modelo neumático de los Biorreactores de Inmersión Temporal solo que no se va a hacer mucho énfasis en ello, más bien este trabajo centrará su atención en los parámetros interactuantes en el proceso y cómo variarán a lo largo de todo el experimento

1.3.2.3 Modelo de las válvulas.

Es importante tener en cuenta el modelo de la válvula porque nos permite conocer en que régimen o zona trabaja, ya que como la válvula utilizada es una válvula electro-neumática es necesario saber cuando se encuentra trabajando para bajo o alto caudal. A continuación se dará una breve panorámica del modelo de válvulas hasta llegar a la que necesitamos en el presente trabajo.

Las válvulas neumáticas comerciales de carrete no son construidas perfectamente ajustadas, dado que el aire no es un buen lubricante y la sensibilidad a la suciedad sería muy grande. Es por ello que, alrededor de la posición central del carrete, se tendrán fugas de aire hacia ambas cámaras del cilindro, y de estas hacia el exterior. En estas condiciones, las válvulas se consideran subdimensionadas (*underlapped valves*)

En general, el modelo de las válvulas electro-neumáticas se divide en dos partes: una primera, correspondiente a la dinámica del posicionamiento de su carrete, que depende fundamentalmente del sistema electromecánico que emplee; y una segunda, que corresponde al modelo de la característica estática del flujo de aire a través del orificio. Dicho flujo de aire depende de la temperatura del aire, el área efectiva del orificio y las presiones antes y después del mismo.

La dinámica de las válvulas empleadas en la actualidad es mucho más rápida que la dinámica de las cargas que se mueven con ellas, de ahí que muchos autores la desprecien (Brun, Belgharbi et al. 2000; Janiszowski 2004). Por ejemplo, la válvula que emplea Brun tiene un ancho de banda de 170 Hz, mientras el actuador sólo responde a 2,4 Hz. No obstante, en el muy completo modelo de Richer, queda modelada esta dinámica para tenerla en cuenta en el diseño del controlador (Richer and Hurmuzlu 2000). También aparece en el modelo de Karpenko como una constante de tiempo con incertidumbre ($3,4 \text{ ms} < \tau_v < 5 \text{ ms}$) (Karpenko and Sepehri 2006).

En cuanto al modelo de la característica estática del flujo de aire a través de la válvula, que es uno de los aspectos que determinan las no linealidades de los sistemas electro-neumáticos, se reportan numerosas variantes. Dos de las más usadas son las siguientes: Una variante resultado de la aplicación de las leyes físicas que se sabe intervienen en el fenómeno. Tressler expone en detalles el desarrollo analítico de este modelo (Tressler, Clement et al. 2002). Belgharbi, por su parte, propone una aproximación polinomial multivariable del mismo (Belgharbi, Thomasset et al. 1999). La otra variante para el modelado del flujo a través de la válvula, es la aproximación que se hace en la norma del catálogo SMC empleada, entre otros, por Kawashima y Janiszowski en sus trabajos (Kawashima, Funaki et al. 2003; Janiszowski 2004; Kawashima, Ishii et al. 2004). Es un modelo mucho más sencillo que el de las leyes físicas y con resultados matemáticos muy

similares. En cualquier variante se puede corroborar que el fluido es proporcional al área efectiva del orificio y a las presiones antes y después del mismo, considerando que la temperatura es constante. También pueden verse dos regímenes de flujo perfectamente definidos:

- Fluido sónico: Cuando la razón de presión es menor que la razón de presión crítica. En este régimen el flujo másico no depende de la razón de presión, sólo del área efectiva si la presión de alimentación es constante.
- Fluido subsónico: Cuando la razón de presión es mayor que la razón de presión crítica. En este régimen el flujo másico sí depende de la razón de presión, disminuyendo con el aumento de la misma.

(En el Anexo II puede verse este modelo en detalles.)

En cualquier caso, el modelo de la característica estática del flujo será una función de al menos dos variables que habría que linealizar si se quiere un modelo lineal.

. Finalmente, al igual que hacen Kawashima y Janiszowski en sus trabajos, como función para la característica estática del flujo de aire a través de la válvula, se toma la aproximación que se hace en la norma internacional SMC por ser un modelo mucho más sencillo, que describe perfectamente el fenómeno que se quiere.

1.3.2.4-Dinámica de las presiones

Un aspecto aún en estudio en el modelado de la dinámica de las presiones es si se considera el proceso de carga y descarga como adiabático o isotérmico. En general, las expresiones que se obtienen con cualquiera de las dos consideraciones, son similares. La única diferencia se manifiesta en que al considerar el proceso adiabático aparece, en la expresión de la variación de presión, la multiplicación por la razón de calor específico. Burrows en su modelado considera el proceso adiabático; sin embargo, demuestra que la influencia de pequeñas variaciones de temperatura en la dinámica de las presiones es despreciable y, por tanto, la considera constante (Burrows 1972). Al considerar el proceso adiabático es necesario desarrollar la dinámica de las presiones a partir de la ley de conservación de la energía lo cual se muestra en detalles en (Tressler, Clement et al. 2002). Por su parte, Richer propone diferenciar la característica térmica del proceso de carga y descarga del

cilindro; considera adiabático el proceso de carga e isotérmico el proceso de descarga (Richer and Hurmuzlu 2000).

Sin embargo, al considerar el proceso isotérmico, la dinámica de las presiones puede obtenerse directamente de la conocida ley de los gases ideales $PV=mRT$, despejando presión y determinando su variación a partir de las derivadas parciales respecto al flujo másico y la variación del volumen. Un ejemplo del uso de esta consideración se puede ver en (Gulati and Barth 2005), donde gracias a ella puede verificarse la convergencia de un observador no lineal de la presión el cual es validado en la práctica.

1.4 Conclusiones del capítulo

- Casi siempre se modela el proceso de crecimiento por técnicas de inteligencia artificial y no precisamente el proceso de llenado-vaciado del dispositivo.
- El modelado del sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal lleva al conocimiento de la variación de algunos parámetros interactuantes en el proceso como la variación de la altura en el frasco de medio, el peso en el frasco de cultivo, la variación de la presión ejercida para la transferencia de líquido de un frasco a otro, la concentración del líquido etc.
- Estos parámetros representan el proceso de crecimiento de la planta, algo que influye directamente en la producción de nuestra provincia.

CAPÍTULO 2. Modelado y Simulación del Sistema Neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal.

2. Introducción al capítulo

En el capítulo 1 se había hecho referencia a los tipos de identificación que existían los cuales estaban basados en los modelos de caja blanca, caja negra y caja gris. El modelo utilizado para la Identificación del sistema neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal es el modelo de caja gris ya que se utiliza cierto conocimiento previo del proceso y el resto del conocimiento se extrae de los datos de entrada-salida del mismo. Para el proceso de transferencia de líquido de un frasco a otro ya sea del frasco de medio al de la vitroplanta o viceversa se necesita una serie de parámetros que solo son encontrados de forma experimental, el resto de los parámetros necesarios para lograr el objetivo propuesto al inicio solo se puede obtener de forma matemática, es decir, basándose en ecuaciones que representan el proceso pero que conlleva a un cierto análisis para finalmente obtener el modelo que representa dicho proceso. Este capítulo tiene como objetivo modelar y simular el sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal para facilitarles a los biólogos la obtención de su modelo general. Es necesario describir el proceso de llenado y vaciado en los Frascos, realizar una explicación detallada de las ecuaciones que representan el proceso y finalmente llegar al modelo que representa el llenado y vaciado de ambos frascos.

2.1 Descripción del proceso de llenado y vaciado de los frascos.

Para conocer el proceso de llenado y vaciado de los frascos es necesario tener entendimiento de los factores que influyen de forma directa para lograr la transferencia del líquido. Conociendo la presión que hay en el fondo del frasco podemos determinar cuánto

demora la transferencia Para ello es necesario conocer la presión que se ejerce en el interior del frasco, que depende de otros parámetros que tienen que ser calculados de forma inicial. En el proceso intervienen dos tipos de fluidos por lo que puede causar contradicciones a la hora de trabajar con ambos.

2.1.1 Flujos compresibles e incompresibles

Aquellos flujos donde las variaciones en densidad son insignificantes se denominan *incompresibles*; cuando las variaciones en densidad dentro de un flujo no se pueden despreciar, se llaman *compresibles*. Si se consideran los dos estados de la materia incluidos en la definición de fluido, líquido y gas, se podría caer en el error de generalizar diciendo que todos los flujos líquidos son flujos incompresibles y que todos los flujos de gases son flujos compresibles. La primera parte de esta generalización es correcta para la mayor parte de los casos prácticos, es decir, casi todos los flujos líquidos son esencialmente incompresibles. Por otra parte, los flujos de gases se pueden también considerar como incompresibles si las velocidades son pequeñas respecto a la velocidad del sonido en el fluido; la razón de la velocidad del flujo, V , a la velocidad del sonido, c entre otras. Para el caso de llenado y vaciado se utiliza la primera definición debido a que el flujo que circula por la tubería es aire por lo tanto es un flujo compresible.

2.1.2 Condiciones iniciales del proceso.

Para modelar el sistema es necesario tener en cuenta las condiciones iniciales y cómo influyen en el proceso, porque es bueno recordar que no se pueden despreciar, ya que aportan información útil y necesaria para lograr la transferencia de líquido. Uno de los factores iniciales influyentes es la masa del aire, ésta depende en sí del volumen de los componentes utilizados a lo largo del proceso como son: tubería, accesorios (regleta de conexión (unión Tee)) y densidad del aire para condiciones especificadas de presión (10^5 Pa) y temperatura (25°C que en grados Kelvin serían 298°K .)

Para el cálculo de la masa inicial se tuvieron presentes algunos datos especificados por el fabricante y otros tomados de forma experimental. En este fragmento del proceso intervienen algunos componentes que se especificarán a continuación.

Tabla 2.1: Tabla de componentes dadas por los fabricantes

Componentes	Descripción	Fabricante/modelo
Tuberías de nylon 12	Øexterior=10mm	
	Øinterior=7.5mm	
	Pmáx de trabajo =10bar	SMC
	Rango de Temp de trabajo	Serie: T1075BU-20
	-20°C–60°C	
Regletas de conexión	Øexterior del tubo =10mm	
	Pmáx de trabajo =10bar	SMC
	Temp de trabajo =0°C –60°C	Serie: KQ2T10-00
T Tubo		

Donde:

Ø → Diámetro ya sea tanto interior como exterior.

La masa inicial del proceso esta dada por:

$$mi = \rho(V_{tub} + V_{fmedio} + V_{rg}) \quad \text{Ec: 2.1}$$

Donde:

V_{rg} → Volumen de la regleta =0,

$$\rho = 1.16 \text{Kg}/m^3$$

$$V_{tub} = A_{tub} * (L_{t1} + L_{t2} + L_{t3}) \quad \text{Ec:2.2}$$

$$V_{tub} = \frac{\pi * (D_{tub})^2}{4} * (L_{t1} + L_{t2} + L_{t3}) \quad \text{Ec: 2.3}$$

Donde:

V_{tub} → Volumen de la tubería

A_{tub} → Área de la tubería.

$$L_{t1}=0.25\text{m}, L_{t2}=0.25\text{m}, L_{t3}=0.25\text{m}, D_{tub}=0.01\text{m}$$

$$V_{tub} = \frac{3.14159 * 0.01^2}{4} * (0.25 + 0.25 + 0.25)$$

$$V_{tub} = 5.888 * 10^{-5} m^3$$

Ahora para el cálculo del volumen del frasco de medio tenemos que:

$$V_{fmedio} = \frac{\pi * (D_{fm})^2}{4} * (h - h_{liqfm}) \quad \text{Ec:2.4}$$

Donde:

D_{fm} → Diámetro del frasco de medio =0.1m

h → Altura total de los frascos expresada en metros =0.17m,

h_{liqfm} → Altura inicial del líquido en el frasco de medio =0.1m,

$$V_{fm} = \frac{3.14159 * 0.1^2}{4} * (0.17 - 0.1)$$

$$V_{fm} = 0.0006084 m^3$$

Luego:

$$m_i = 1.16 * (5.888 * 10^{-5} + 0.0006084)$$

$$m_i = 0.0007201 \text{ Kg} = 0.7201\text{g}$$

A continuación se presenta en la figura 2.1 el fragmento referente a la masa inicial que se refleja en el proceso de llenado.

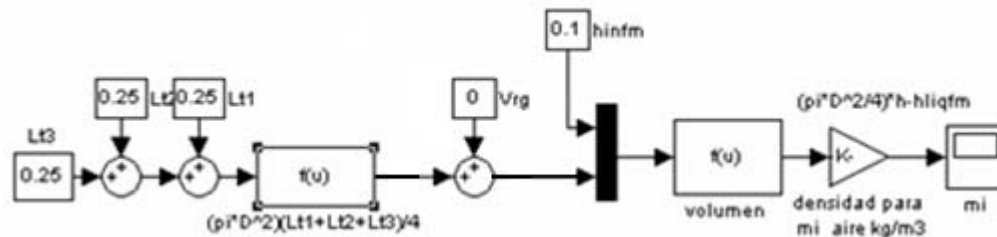


Figura2.1: Fragmento referente a la masa inicial

2.1.3 Cálculo de las variables para el frasco de medio en el proceso de llenado.

Es bueno partir del concepto de variable, esto puede ser de vital importancia para las aplicaciones que a continuación se muestran. Una variable es aquello que varía o puede variar, se comporta como algo inestable, inconstante y mudable.

Como variables en este proceso tenemos: la masa real del aire que depende en gran medida de los valores iniciales de la masa del aire, la presión de aire que necesita que llegue al frasco de medio porque actúa de forma directa a la hora de obtener el valor de la presión que hay en el fondo del frasco de medio que es la que se necesita para la transferencia del líquido, esta presión depende de la presión de aire antes mencionada, densidad y altura del líquido como se había dicho anteriormente, esta es otra de las variables que interactúan en el experimento. Luego de transferido el líquido es necesario conocer el valor de la masa de líquido que va a nutrir la planta que se encuentra en el otro frasco y finalmente se calcula el valor de la altura del frasco que es la variable que va a mostrar como se comporta el proceso de llenado.

Es preciso mostrar las variables con su simbología para una mayor comprensión:

Altura real del líquido (*Murashige-skoog*) para frasco de medio $\rightarrow h_{rligfm}$

Altura real del líquido (*Murashige-skoog*) para el frasco de vitroplantas $\rightarrow h_{rliqfv}$

Masa del aire cuando la válvula pasa de off/on $\rightarrow m_a$

Masa real del aire $\rightarrow m_r$

Presión de alimentación $\rightarrow P_s$

Presión a la salida de la válvula $\rightarrow P_1$ (para frasco de medio) $\rightarrow P_2$ (para frasco de vitroplantas)

Presión atmosférica $\rightarrow P_a$

Presión en el fondo del frasco $\rightarrow P_{10}$ (frasco de medio) $\rightarrow P_{20}$ (Frasco de vitroplantas).

En la figura 2.2 se muestra un esquema donde se ubican todas las variables que representan el proceso

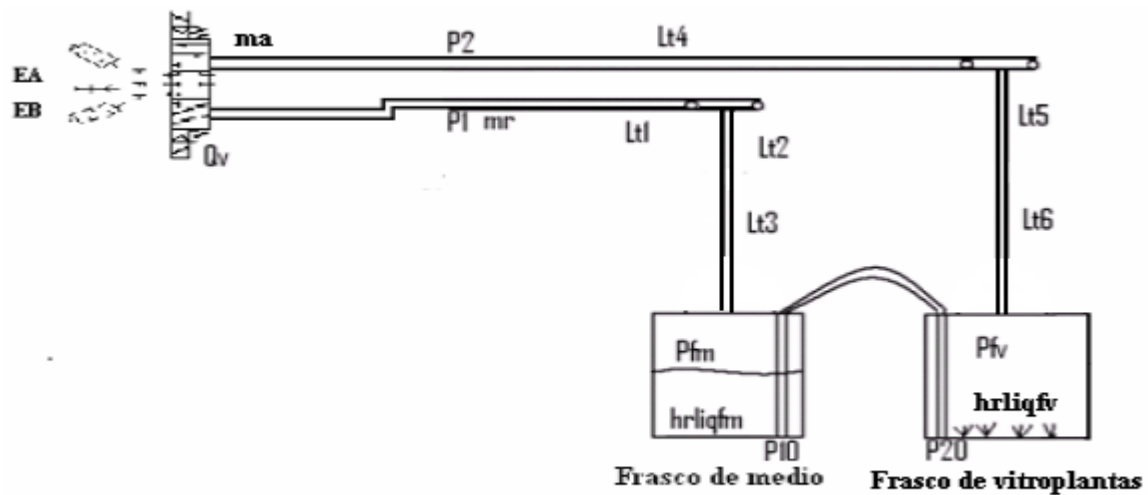


Figura2.2 Esquema de ubicación de las variables que representan el proceso.

Éstas variables pueden variar a lo largo del experimento debido a que desde que la planta comenzó a tomar los nutrientes provenientes de la concentración del *Murashige-skoog* la altura del líquido en el frasco de medio comienza a disminuir como consecuencia de la

nutrición. La densidad del líquido varía porque toma componentes del *Murashige-skoog* y los absorbe y puede variar la presión debido al crecimiento de la planta. Lo antes expuesto son variaciones que pueden experimentar estos parámetros y que es el motivo por el cual los llamamos variables interactuantes, o mejor dicho, que representan el proceso.

Antes de comenzar con el cálculo de dichas variables es necesario especificar los datos que da el fabricante de algunos componentes que intervienen en el llenado y vaciado de los frascos los cuales son mostrados en la tabla 2.2 (para mayor información de los datos del fabricante para el caso de la electro válvula ver anexo III).

Tabla 2.2: Tabla de componentes dada por los fabricantes.

Componentes	Descripción	Fabricante/Modelo
Electroválvula on/off de 5/3 vías con centro a escape	12Vcc,24Vcc	SMC
	24Vca,110Vca,220Vca	Serie: SY5420-5DZ-01F
	Racor Ø 8	
Sensor–Transmisor de presión	Rango de presión entre 0-10bar	Trafag
	Us (+)→9...30V DC	S/N: 308024-115
	Us (-)→4....20mA	

La masa de aire es el primer elemento que vamos a tener en cuenta porque de ella se derivan otras variables que dependen en sí del valor obtenido de dicha masa. La electroválvula tiene algunas características que no pueden ser desechadas.

Para conocer el flujo que circula por la tubería es necesario conocer en que zona esta trabajando (sónica o subsónica). Si esta trabajando en zona sónica entonces es aplicable el gran caudal que solo depende de la presión de alimentación, de la temperatura de trabajo y del coeficiente de la válvula. Si se encuentra en la zona subsónica entonces es aplicable el bajo caudal que depende además de los parámetros antes mencionados de la presión de salida que es la que va a circular por la tubería y va a influir en la presión que llega al

frasco. No obstante existen condiciones que son las que reflejan el régimen o zona en que se encuentra, éstas dependen de las presiones de entrada y salida de la válvula (Para más información ver anexo IV). Están expresadas como una comparación que a continuación se mostrará.

Condición de trabajo en régimen sónico:

$$P_s + 1.013 \geq 1.89(P_1 + 1.013) \quad \text{Ec:2.5}$$

Condición de trabajo en régimen subsónico:

$$1.013 + P_s < 1.89(P_1 + 1.013) \quad \text{Ec: 2.6}$$

Existen dos expresiones para el cálculo del flujo que circula por la tubería:

Gran caudal (zona (régimen) sónica):

$$Q = 200C_v (P_s + 1.013) \sqrt{\frac{273}{273 + T(^{\circ}C)}} \quad \text{Ec:2.7}$$

Bajo caudal (zona (régimen) subsónica):

$$Q = 400C_v \sqrt{((P_s - P_1)(P_1 + 1.013))} \sqrt{\frac{273}{273 + T^{\circ}C}} \quad \text{Ec:2.8}$$

Donde:

$P_s \rightarrow$ Es la presión de alimentación que se le va adicionar de manera manual.

$P_1 \rightarrow$ Presión a la salida de la válvula.

$T \rightarrow$ Temperatura de trabajo

$C_v \rightarrow$ Es el coeficiente de la válvula=0.42. Este valor fue calculado tomando como presión de alimentación 6 bar con una caída de presión de 1bar. Son datos tomados del catálogo de SMC. (Remitirse a Anexo III)

Luego:

$$Q = [Nl/min]$$

El fabricante también especifica que el caudal para esta válvula está expresado en Nl/min. A continuación se dará una explicación detallada de esta unidad de medida.

Existen interrelaciones entre volumen, presión y temperatura, lo cual implica que sea necesario referir todos los datos de volumen de aire, a una unidad estandarizada, el metro cúbico estándar, Nm³. Este es la cantidad de 1,293 Kg. de masa de aire, a una temperatura de 0 °C, y una presión absoluta de 760 mm. de Hg. (Esto es, a nivel del mar). La unidad básica para el gasto volumétrico "Q" es el metro cúbico normal (Nm³) Y en la neumática practica, los volúmenes se expresan en términos de litros/minuto (Nl/minuto) ó decímetros cúbicos normales por minuto (Ndm³/minuto). Por lo que la expresión Nl/minuto, tiene en cuenta una masa de aire, a una temperatura de 0°C y una presión (a nivel del mar) de 760 mm. de Mercurio (Hg.)

El objetivo de la obtención de flujo volumétrico que nos aporta la válvula es para calcular la masa de aire. El flujo másico depende del flujo volumétrico antes calculado y de la densidad para estas condiciones de presión y temperatura que imponen los litros normalizados. Su expresión matemática esta dada por:

$$Q_M = \rho Q_V \quad \text{Ec:2.9}$$

Donde:

Q_M → Es el flujo Másico como se expresaba anteriormente

Q_V → Es el flujo volumétrico también expresado anteriormente.

ρ → E la densidad para las condiciones de presión y temperatura referidos por el fabricante.

$$\rho = 1.2310^{-3} \text{ Kg} / \text{Nl}$$

Aplicando la ecuación de continuidad el flujo másico puede ser expresado como donde $m = \rho V$ por lo que podemos decir que:

$$Q_M = \frac{\partial m}{\partial t} \quad \text{Ec:2.10}$$

Por lo tanto:

$$m = \int Q_M \partial t \quad \text{Ec:2.11}$$

A continuación se muestra la representación grafica de este fragmento del modelo:

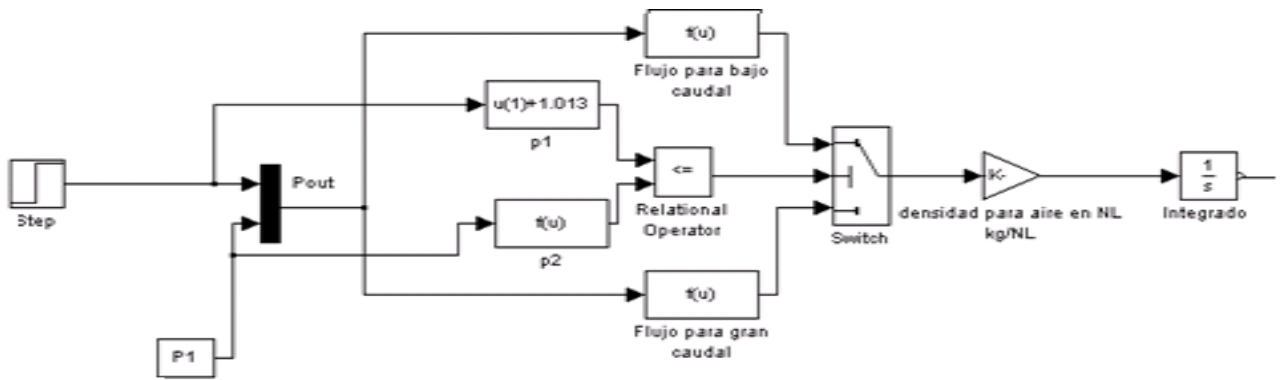


Figura2.3: Fragmento del modelo de la masa cuando está en funcionamiento la válvula

La masa real será finalmente la masa que circula por la tubería después de estar la válvula en funcionamiento en adición con la masa inicial del aire que esta atrapada en todos los componentes que conforman el experimento, desde la tubería hasta el frasco pasando por la regleta de conexión. Quedaría de la siguiente forma:

$$m_R = m + m_i \quad \text{Ec:2.12}$$

Donde:

m_R → Es la masa real que se obtiene de la suma de las otras dos unidades.

m → Es la masa que circula por la tubería cuando la válvula comienza a funcionar

$m_I \rightarrow$ Es la masa inicial calculada al inicio del capítulo.

2.2 Cálculo de la presión de aire mediante la ecuación de los gases.

Para la realización del cálculo de la presión mediante la ecuación de los gases es necesario tener en cuenta que el aire se comporta como un gas ideal, sabiendo además que los gases no tiene ni forma ni volumen específico por lo que toma la forma y volumen del componente donde esté atrapado, por lo tanto se puede plantear la ecuación de los gases. Ecuación de los Gases:

$$P_{fm} = \rho RT \quad \text{Ec:2.13}$$

Pero como se había comentado anteriormente $m = \rho V$

Por lo tanto: $\rho = \frac{m}{V}$ lo que conlleva finalmente a que la presión quedaría establecida de la siguiente manera:

$$P_{fm} = \frac{mRT}{V} \quad \text{Ec:2.14}$$

Siendo:

$R \rightarrow$ Constante universal de los gases que se define como una constante física que relaciona entre sí diversas funciones de estado termodinámicas, estableciendo esencialmente una relación entre la energía, la temperatura y la cantidad de materia. El valor tomado para esta constante fue: $R=287.2 \text{ J/}^\circ\text{K*Kg}$

$V \rightarrow$ Este volumen encierra en sí la suma de los volúmenes de cada componente del proceso.

Haciendo un análisis de las unidades de medida tenemos que:

$$P_{fm} = \frac{\text{Kg} * (\text{J} / \text{Kg} * ^\circ\text{K}) * ^\circ\text{K}}{\text{m}^3} \quad \text{Donde: } J=N*m$$

Por lo tanto:
$$P_{fm} = \frac{Kg * ((N * m) / Kg * ^\circ K) * ^\circ K}{m^3}$$

Finalmente quedaría:
$$P_{fm} = \frac{N}{m^2} = Pa.$$

2.2.1 Cálculo de la presión en el fondo del frasco de medio.

Ya calculada la presión que entra al frasco podemos adentrarnos mas específicamente al objetivo del presente trabajo que es el cálculo de la presión que tiene que ejercerse para que ocurra la transferencia de líquido.

Luego:

$$P_{10} = P_{fm} + \rho_L * g * h_{rligfm} \quad \text{Ec:2.15}$$

Donde:

$P_{10} \rightarrow$ Presión necesaria para que ocurra la transferencia del líquido.

$\rho_L \rightarrow$ Densidad del líquido = $1027 \text{ Kg} / m^3$

$g \rightarrow$ Constante de la gravedad = $9.8m/s^2$

$h_{rligfm} \rightarrow$ Altura real del líquido en el frasco de medio

Haciendo un análisis de las unidades de medida tenemos que:

$$P_{10} = Pa + Kg / m^3 * m / s^2 * m$$

$$P_{10} = Pa + Kg * m / s^2 (Pa)$$

P_{10} está expresado en Pa (SIU). Es preciso convertirlo a bar para mantener las presiones en esa unidad de medida. Para la conversión de unidades tenemos que 1bar absoluto= 10^5 Pa, luego bar relativo es bar absoluto disminuido en uno.

Este fragmento pertenece al cálculo de P_{10} y a la conversión de unidades a bar relativo.

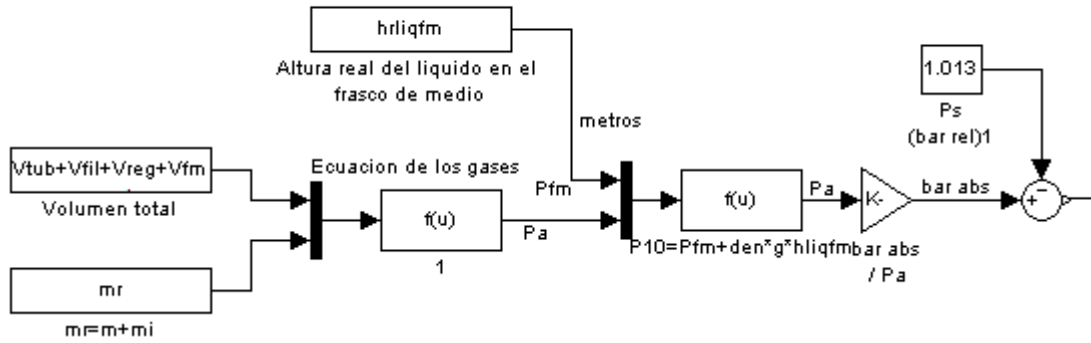


Figura 2.4: Fragmento del modelo que representa el cálculo de la presión en el fondo

2.3 Cálculo de las variables para el frasco de vitroplantas en el proceso de llenado.

Para el frasco de la vitroplanta es similar la operación solo que existen algunos parámetros que presentan variaciones en su valor, lo cual provoca que los mismos tengan una función diferente dentro del proceso de llenado.

En el caso del frasco de las vitroplantas la altura del líquido es cero debido a que en el frasco debe estar solo la planta nutriéndose de lo que pudo obtener en el ciclo pasado. Para este proceso los parámetros que cambian están ciertamente relacionados solo que hay parámetros que cambian en su valor.

Para el cálculo de la masa inicial para el frasco de las vitroplantas tenemos que:

$$mi = \rho(V_{tub} + V_{f vitro} + V_{rg}) \quad \text{Ec:2.16}$$

Donde:

$V_{rg} \rightarrow$ Volumen de la regleta =0,

$\rho=1.16\text{Kg}/\text{m}^3$: Esta es la densidad para las condiciones de presión y temperaturas explicadas para el caso anterior

$V_{tub} \rightarrow$ Volumen de la tubería (Se considera también V_{tub} porque en este caso los parámetros no varían ya que las longitudes de la tubería son las mismas en todo el proceso)

Para el cálculo del volumen de la tubería se emplean las ecuaciones 2.2 y 2.3.

$$V_{tub} = \frac{3.14159 * 0.01^2}{4} * (0.25 + 0.25 + 0.25)$$

$$V_{tub} = 5.888 * 10^{-5} m^3$$

Ahora para el cálculo del volumen del frasco de las vitroplantas tenemos que:

$$V_{fvitro} = \frac{\pi * (D_{fv})^2}{4} * (h - h_{liqfv}) \quad \text{Ec:2.17}$$

Donde:

$D_{fv} \rightarrow$ Diámetro del frasco de vitroplantas =0.1m.

$h \rightarrow$ Altura total de los frascos expresada en metros =0.17m.

$h_{liqfv} \rightarrow$ Altura inicial del líquido en el frasco de vitroplantas =0m.

$$V_{fv} = \frac{3.14159 * 0.1^2}{4} * (0.17 - 0)$$

$$V_{fv} = 0.001335 m^3$$

Luego:

$$m_i = 1.16 * (5.888 * 10^{-5} + 0.001335)$$

$$m_i = 0.00683008 \text{ Kg expresándolo en gramos sería } 6.83008 \text{ g.}$$

Luego para el cálculo del flujo que circula por la tubería el procedimiento es el mismo y el juego de expresiones matemáticas es similar, sin embargo a la hora de sustituir los parámetros por valores estos van a expresar cambios.

Se tiene que:

Gran caudal (zona (régimen) sónica):

$$Q = 200C_v (P_2 + 1.013) \sqrt{\frac{273}{273 + T(^{\circ}C)}} \quad \text{Ec: 2.18}$$

Bajo caudal (zona (régimen) subsónica:

$$Q = 400C_v \sqrt{((P_2 - P_a)(P_a + 1.013))} \sqrt{\frac{273}{273 + T^{\circ}C}} \quad \text{Ec: 2.19}$$

Donde:

$P_2 \rightarrow$ Es la presión que va entrando al frasco de las vitroplantas.

$P_a \rightarrow$ Presión atmosférica. En este caso mientras ocurre el proceso de llenado la presión va entrando al frasco de medio pero siempre va a existir un escape a la atmósfera que va a ser por la tubería que conecta el frasco de las vitroplantas con la electroválvula.

$T \rightarrow$ Temperatura de trabajo. Su valor está especificado en el cálculo de las variables para el caso del frasco de medio.

$C_v \rightarrow$ Es el coeficiente de la válvula (Especificado también en el frasco de medio).

Con el valor del flujo volumétrico obtenemos el flujo másico utilizando la ecuación 2.9

Luego con la ecuación antes utilizada 2.10 y 2.11 se obtiene el valor de la masa.

Con el valor de la masa calculamos mediante la ecuación de los gases el valor de la presión que llega al frasco siempre teniendo presente el efecto que causa el filtro en el proceso la cual queda expresada como:

$$P_{fv} = \frac{mRT}{V} \quad \text{Ec:2.20}$$

Siendo:

$R \rightarrow$ Constante universal de los gases.

$V \rightarrow$ Volumen que encierra en sí la suma de los volúmenes de cada componente del proceso. En este caso el volumen variaría su valor porque lleva implícitamente el valor de la altura inicial del líquido en el frasco de las vitroplantas.

2.3.1 Cálculo de la presión en el fondo del frasco de vitroplantas.

Para el caso del frasco de vitroplantas tenemos que:

$$P_{20} = P_{fv} + \rho_L * g * h_{liqfv} \quad \text{Ec:2.21}$$

Donde:

P_{20} → Presión necesaria para que ocurra la transferencia del líquido.

ρ_L → Densidad del líquido = $1027 \text{ Kg} / \text{m}^3$

g → Constante de la gravedad = 9.8 m/s^2

h_{liqfv} → Altura real del líquido en el frasco de las vitroplantas.

Haciendo un análisis de las unidades de medida:

$$P_{20} = Pa + Kg / m^3 * m / s^2 * m$$

$$P_{20} = Pa + Kg * m / s^2 (Pa)$$

Es necesario realizar la conversión de unidades de la presión para obtener todos los valores basados en el bar relativo. Para la conversión de unidades se tiene que: 1bar absoluto= 10^5 Pa pero para convertirlo a bar relativo que es la unidad con la que se trabaja desde un inicio es preciso al valor real convertido a bar absoluto restarle uno.

2.4 Cálculo del flujo volumétrico del líquido

Con los valores de presión en el fondo de ambos frascos podemos llegar al valor del flujo volumétrico. ¿Por qué es importante conocerlo?. Para saber el comportamiento de la altura del líquido en el proceso de llenado es preciso razonar todo el mensaje que es capaz de transmitirnos el líquido durante su recorrido.

EL flujo volumétrico del líquido está expresada como:

$$Q_{VL} = K \sqrt{(P_{10} - P_{20})} \quad \text{Ec:2.22}$$

Donde:

$K \rightarrow$ Es la constante del líquido $= 10^{-4}$

$P_{10} \rightarrow$ Presión en el fondo del frasco de medio.

$P_{20} \rightarrow$ Presión en el fondo del frasco de las vitroplantas.

Luego de calculado el flujo volumétrico de líquido hallamos el valor del flujo másico la cual se calcula como sigue:

$$Q_{ML} = \rho_L Q_{VL} \quad \text{Ec:2.23}$$

Donde:

$\rho_L \rightarrow$ Densidad del líquido (Murashige).

$Q_{mL} \rightarrow$ Es el flujo másico del líquido

$Q_{VL} \rightarrow$ Es el flujo volumétrico del líquido.

Luego:

$$Q_{ML} = \frac{\partial m}{\partial t} \quad \text{Ec:2.24}$$

Por lo tanto:

$$m = \int Q_{ML} \partial t \quad \text{Ec:2.25}$$

Como se había planteado previamente: $m = \rho V$

Luego:

$$m = \rho A \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ec:2.26}$$

Despejando la ecuación tenemos que:

$$h = \frac{m}{\rho A} \quad \text{Ec:2.27}$$

Obtención del proceso de llenado

Este es el fragmento del modelo referente a la variación del líquido:

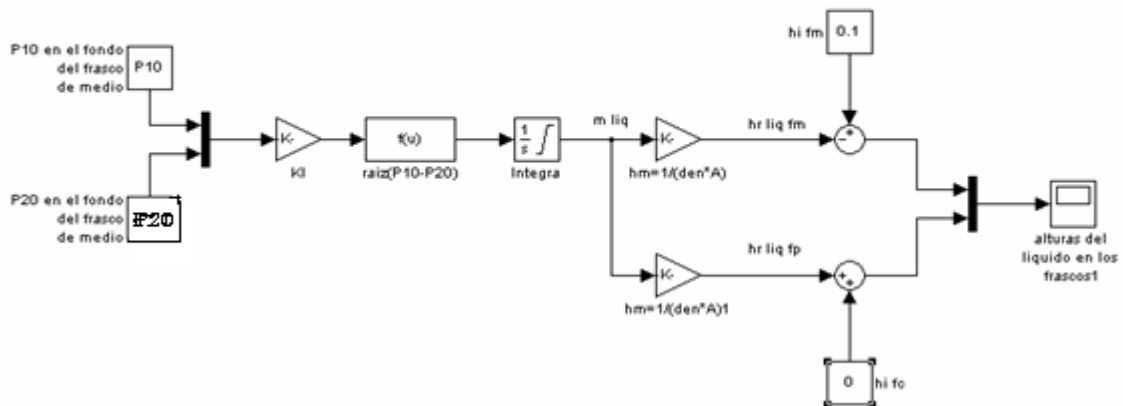


Figura2.5: Fragmento del modelo del proceso de llenado con respecto a la altura.

El modelo neumático obtenido para el proceso de llenado se mostrará a continuación:

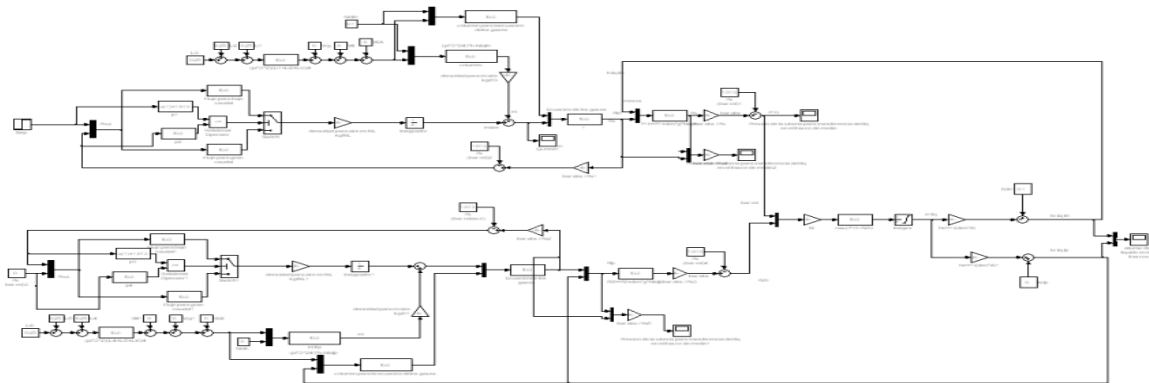


Figura2.6: Modelado del proceso de llenado

A continuación se mostrará la gráfica del comportamiento de las alturas ambos frascos:

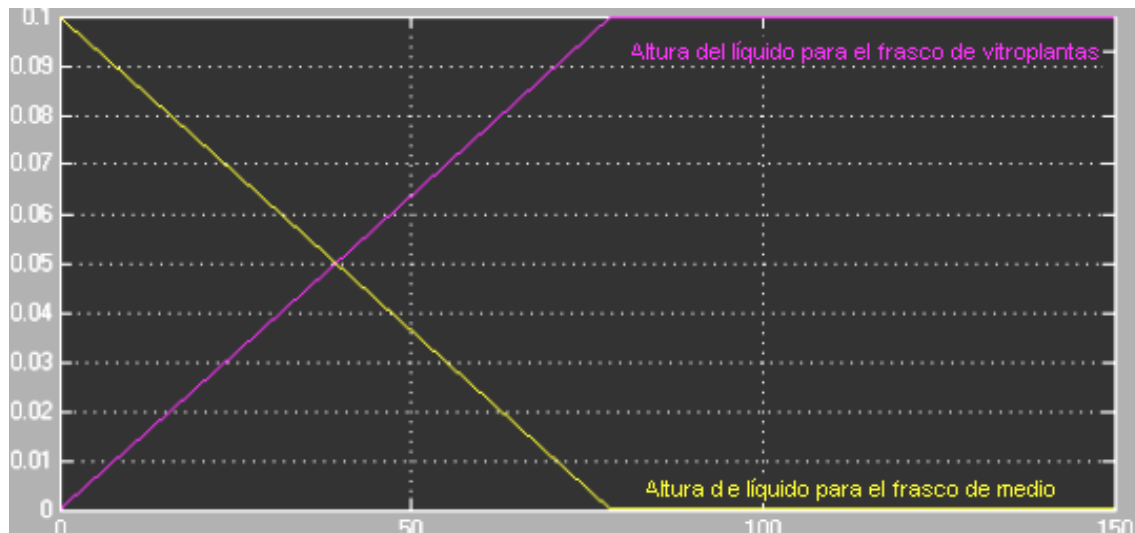
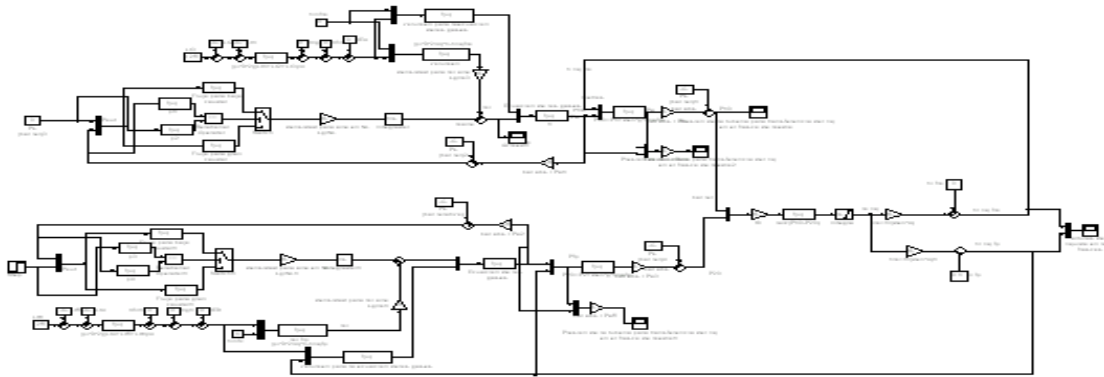


Figura2.7: Simulación del proceso de llenado

2.5 Proceso de vaciado.

En el proceso de vaciado el comportamiento es el mismo solo que en el proceso de llenado la válvula empujaba el flujo de aire hacia el frasco de medio y la transferencia del líquido era desde el frasco de medio hacia el frasco de las vitroplantas. Ahora para este proceso ocurre exactamente lo contrario, el flujo que va a circular por la tubería propio de la válvula en funcionamiento va a ir al frasco de vitroplantas y la transferencia del líquido va desde el frasco de las vitroplantas hacia el frasco de medio. En cuanto al cálculo de los parámetros el procedimiento es similar, y las variables son ahora calculadas para el frasco de vitroplantas.

Este es el modelo para el proceso de vaciado:



2.8 Modelo del proceso de vaciado

La figura 2.8 muestra mediante la simulación el comportamiento del proceso de vaciado para ambos frascos.

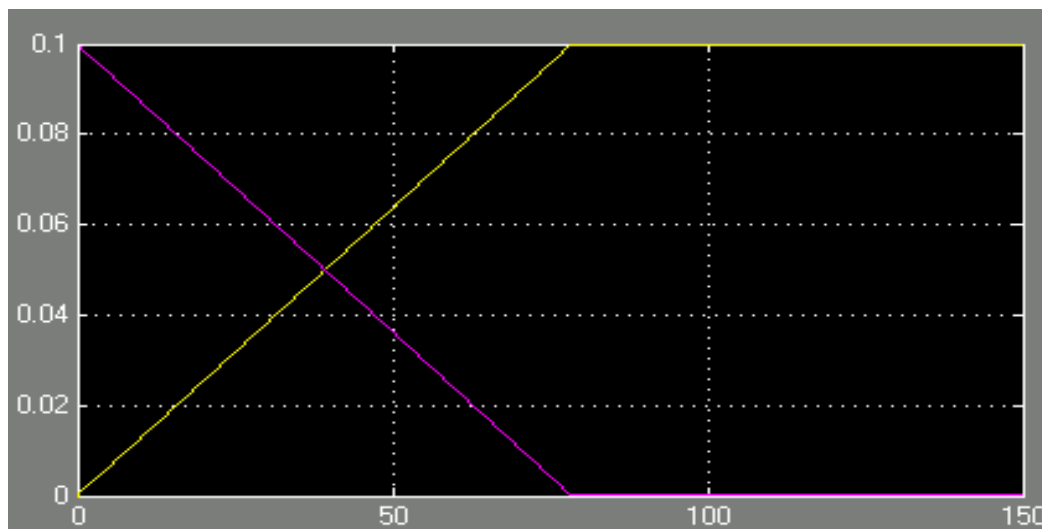


Figura 2.9 Simulación del proceso de vaciado.

Donde:

Amarillo: Altura del líquido para el frasco de medio en el proceso de vaciado

Rosado: Altura del líquido para el frasco de vitroplantas en el proceso de vaciado.

2.6 Conclusiones del Capítulo

De todo lo anterior se puede concluir que:

- Mediante el modelado del sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal se describe la dinámica del sistema de forma precisa. Esta demostración se valida comparando el modelo teórico y las curvas que se obtiene de forma experimental.
- El tiempo en el proceso de llenado y vaciado se comporta de manera similar. Esto ocurre en condiciones ideales del proceso, es decir, cuando no haya ninguna perturbación que lo haga variar el sistema. Por ejemplo: A medida que se manifiesta el crecimiento de las plantas, cuando se transfiere el líquido del frasco de vitroplantas al frasco de medio la presión de aire va a ser mayor producto a que las plantas ejercen cierta influencia que se opone al movimiento provocando que demore un intervalo de tiempo superior el proceso de vaciado que el proceso de llenado.

CAPÍTULO 3. Análisis y Discusión de los resultados.

3. Introducción al capítulo

Para saber si el modelo empleado resulta efectivo es necesario compararlo con los datos reales de las curvas que muestran el comportamiento en tiempo real. Al superponer ambas curvas (el modelo propuesto y las curvas experimentales) se demuestra si los resultados alcanzados son deseados y si el modelo propuesto cumple con las características requeridas para que los investigadores biólogos y productores puedan obtener su modelo neumático general en el centro de Bioplantas en la Universidad de Ciego de Ávila.

En este capítulo se va a realizar una comparación de la altura de ambos frascos tanto de forma experimental como de forma analítica (modelo planteado) siendo ésta la variable principal a obtener en el modelo diseñado. Se puede observar luego de dichas comparaciones un análisis mediante la superposición de curvas y valorar el porcentaje de ajuste entre ambas curvas y corroborar que el modelo propuesto cumple con todas las características, quedando así demostrado la importancia y precisión del modelo del sistema neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal. Es necesario tener en cuenta el balance económico para establecer una vez más que este modelo es realizable, ya que proporciona los componentes con un control costo-beneficio favorable para todas aquellas empresas o centros que empleen este modelado.

3.1 Validación de los resultados obtenidos

Con el surgimiento de esta nueva propuesta llamada SmartBIT®, Biorreactor de 4ta Generación, con Dispositivos de Control de Proceso (PCD), acoplados a una Computadora Personal (PC), en la cual corre un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) que permite visualizar y monitorear en tiempo real del proceso en los BIT, de

forma sencilla y eficiente logramos almacenar disímiles curvas que exponen como se comporta las variables que interactúan en el proceso. En este caso se realizará el estudio y análisis de la altura del líquido (*Murashige-skoog*) en tiempo real. Si a éste parámetro adquirido de forma real le multiplicamos el valor de la densidad del líquido entonces obtenemos la curva que muestra el comportamiento del nivel (altura), siendo éste nuestro objetivo principal.

3.1.1 Análisis de la altura del líquido en ambos frascos.

El comportamiento de la masa del líquido de forma experimental revela ciertas perturbaciones que son propias de falseo en la medición, la cual siendo corregidas y a su vez multiplicadas por la densidad del líquido (*Murashige-skoog*), proporciona como resultado el comportamiento de la altura de ambos frascos. Esto se debe a que se imposibilitó la obtención de un sensor de nivel que midiera directamente la altura, por lo que teniendo como instrumento de medición a nuestro alcance un sensor trasmisor de peso, se realizó la medición del peso obteniendo finalmente el valor de la masa del líquido sin ningún otro agente perturbador, lo cual posibilitó mediante un análisis matemático la obtención del comportamiento de la altura en tiempo real. Luego se hizo necesario la comparación de ambas curvas para confirmar la claridad del modelo programado.

A continuación se muestra el análisis de la altura para obtener el comportamiento de las curvas en tiempo real:

$$m_{rliquido} = \rho_{liquido} \times A \times h_{rliqfm} \quad \text{Ec:3.1}$$

Por lo tanto:

$$h_{rliqfm} = \frac{m_{rliquido}}{\rho_{liquido} \times A} \quad \text{Ec:3.2}$$

De esta forma se consigue la confección de la curva de la altura para luego ser comparada con la obtenida analíticamente. La figura 3.1.2a) muestra la superposición de ambas curvas para el frasco de medio manifestando la realidad del modelo sugerido. Estas curvas se obtuvieron para las condiciones iniciales antes mencionadas, es decir, al principio de montado el experimento.

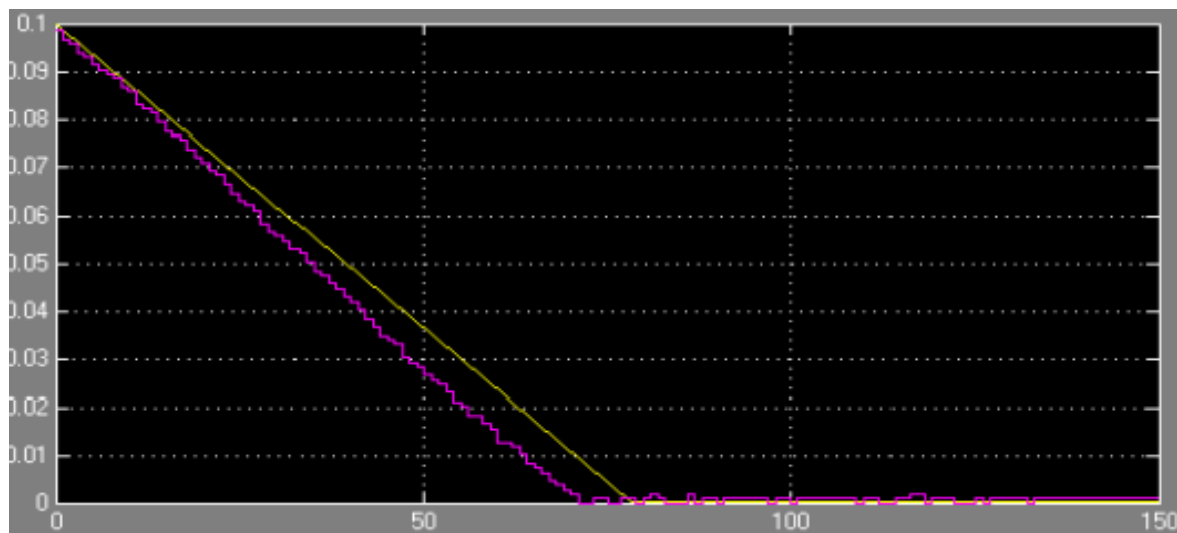


Figura 3.1: Superposición de las curvas experimental y analítica para el frasco de medio.

Donde:

Amarillo: La curva analítica del frasco de medio para el proceso de llenado.

Rosado: La curva experimental del frasco de medio para el proceso de llenado.

Como se observa en la figura 3.1 el comportamiento del modelo analítico y la curva experimental es similar por lo que al establecer la superposición de las curvas se demuestra la verdad del modelo, pues se obtuvo el comportamiento de la altura, consiguiendo visualizar en un tiempo dado el estado en que se encuentra el nivel sin necesidad de presenciarlo sensorialmente.

Para la comparación cuantitativa de los modelos obtenidos con cada estructura, se utiliza el índice de validación de modelos conocido como “porcentaje de ajuste de la salida del modelo a la salida real medida” (*FIT*), definido en el *Toolbox* de Identificación como:

$$FIT = \left[1 - \frac{\text{norma}(\mathbf{y}_m - \mathbf{y})}{\text{norma}(\mathbf{y} - \text{media}(\mathbf{y}))} \right] 100\% \quad \text{Ec: 3.3}$$

Donde $\mathbf{y}_m$ es el vector de la salida simulada del modelo ante la misma entrada con que se obtiene el vector de salida del sistema real $\mathbf{y}$.

A continuación se muestra una tabla donde se muestran los datos tomados para el cálculo del por ciento de ajuste

Tabla3.1: Tabla de valores para el cálculo del por ciento de ajuste

N	Datos del Modelo	Datos Reales
1	0.01800000	0.00800000
2	0.03600000	0.02800000
3	0.04000000	0.03300000
4	0.05000000	0.05600000
5	0.06500000	0.06200000
6	0.06800000	0.06500000
7	0.08100000	0.08000000
8	0.09000000	0.08950000
9	0.96300000	0.09600000
10	0.09850000	0.09930000

Luego realizando el ajuste de curvas se obtiene que:

FIT=82.2988% de ajuste para el caso del frasco de medio por lo que se puede plantear que el modelo neumático tiene un por ciento de ajuste adecuado, de acuerdo a las exigencias impuestas por el modelo obtenido.

La figura 3.2 refleja la superposición de las curvas en el frasco de vitroplantas para el proceso de llenado.

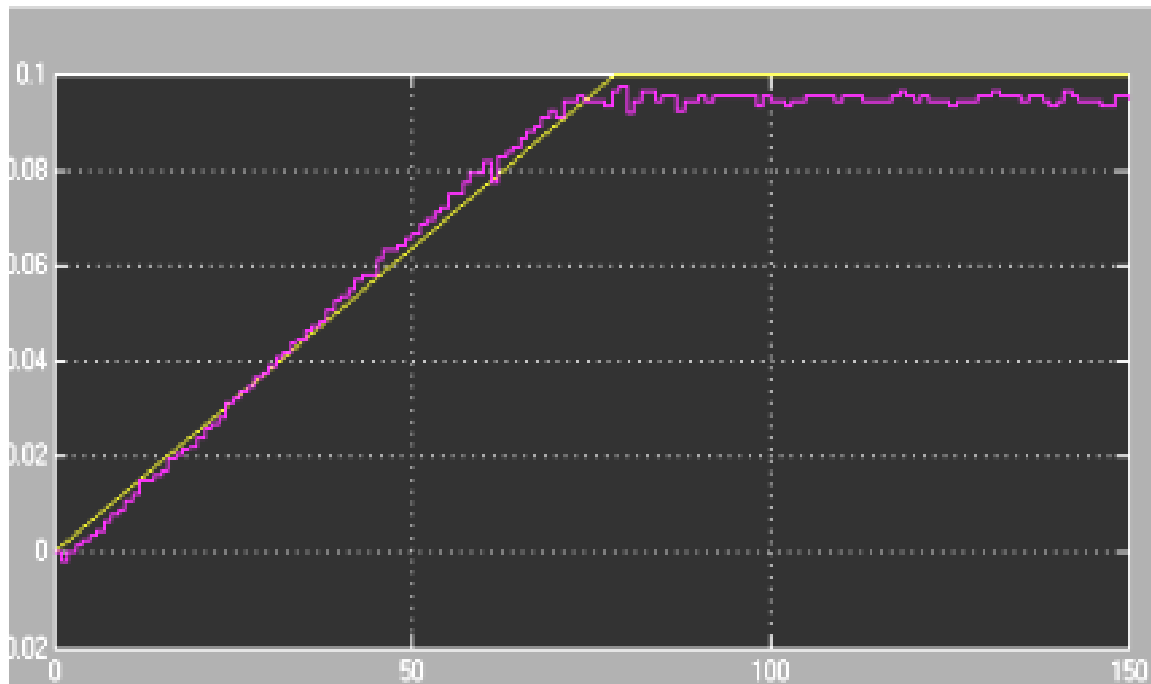


Figura 3.2 Superposición de las curvas experimental y analítica para el frasco de vitroplantas.

Donde:

Amarillo: La curva analítica del frasco de vitroplantas para el proceso de llenado al inicio del experimento.

Rosado: La curva experimental del frasco de vitroplantas para el proceso de llenado al inicio del experimento.

En este caso la curva experimental y analítica se comportan del mismo modo por lo que planteamos una vez más la veracidad del modelo diseñado demostrando que dicho modelo cumple con las exigencias de los investigadores biólogos y productores, permitiéndole la visualización de la nutrición y evolución de las plantas.

Luego realizando el cálculo del porcentaje de ajuste para la gráfica del frasco de vitroplantas se utiliza la siguiente tabla de valores como sigue:

Tabla 3.2 Tabla de muestras tomadas para el cálculo del porcentaje de ajuste:

N	Datos del modelo	Datos reales
1	0.003500000	0.00200000
2	0.010000000	0.00800000
3	0.019000000	0.01700000
4	0.031600000	0.03200000
5	0.036000000	0.03600000
6	0.044000000	0.04450000
7	0.053000000	0.05700000
8	0.064800000	0.06700000
9	0.08500000	0.08500000
10	0.09400000	0.09500000

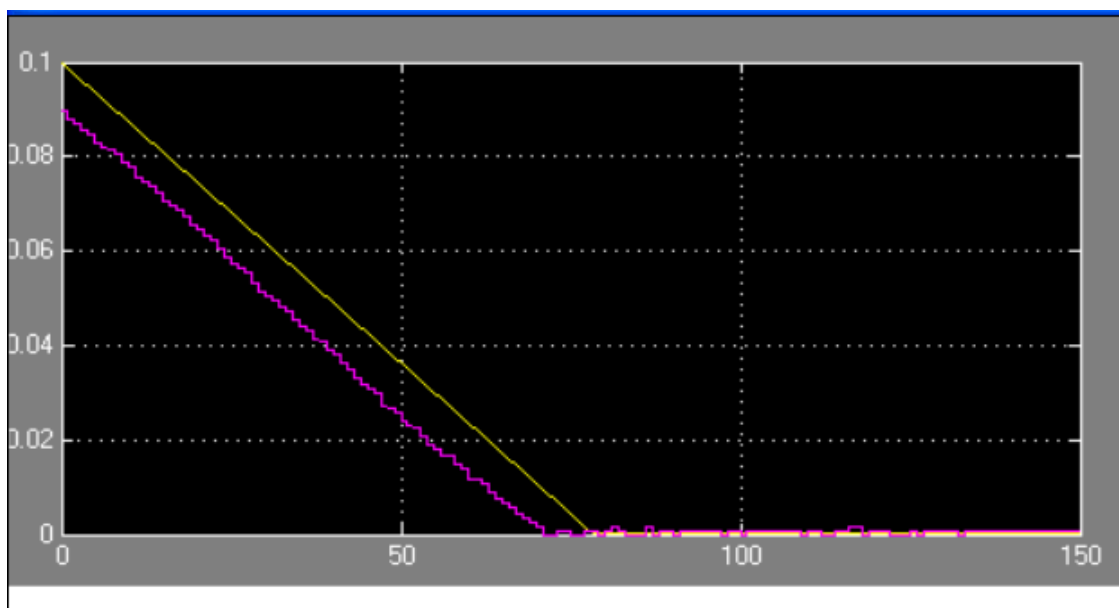
Luego realizando el ajuste de curvas se tiene que:

FIT= 93.9827% de ajuste para el caso del frasco de vitroplantas por lo que se puede plantear que el modelo neumático tiene un por ciento de ajuste mayor que para el caso del frasco de medio. Este por ciento de ajuste para ambos frascos demuestra que el modelo se aproxima a las exigencias impuestas por el experimento en tiempo real

Como se puede observar también en la superposición de las curvas el ajuste para el frasco de vitroplantas se comporta con un valor elevado (93.98.27 %) lo que verifica que al inicio de montado el experimento nuestro modelo se muestra muy eficaz.

Luego de un tiempo de estar en funcionamiento el experimento las condiciones iniciales para el proceso real cambiaron. Dado que la planta ha tomado durante todo este tiempo los nutrientes provenientes de la concentración del *Murashige-skoog*, la altura ha disminuido y por lo tanto se muestra reflejado en la figura 3.1.2c). Si se realiza un estudio del comportamiento de ambas curvas se percibe que el ajuste realizado en el Toolbox del MATLAB comienza a disminuir su valor, debido a que el modelo analítico se mantiene para las condiciones iniciales sin mostrar cambios.

La gráfica 3.3 muestra el comportamiento de las curvas del frasco de medio para estas nuevas condiciones iniciales:



Gráfica 3.3 Superposición de ambas curvas cuando han cambiado las condiciones iniciales

Donde:

Amarillo: La curva analítica del frasco de medio para el proceso de llenado luego de varios días de funcionamiento del experimento.

Rosado: La curva experimental del frasco de medio para el proceso de llenado luego de varios días de funcionamiento del experimento.

A continuación se proporcionará un juego de valores para estas nuevas condiciones:

Tabla 3.2: Valores determinados para el cálculo del porcentaje de ajuste

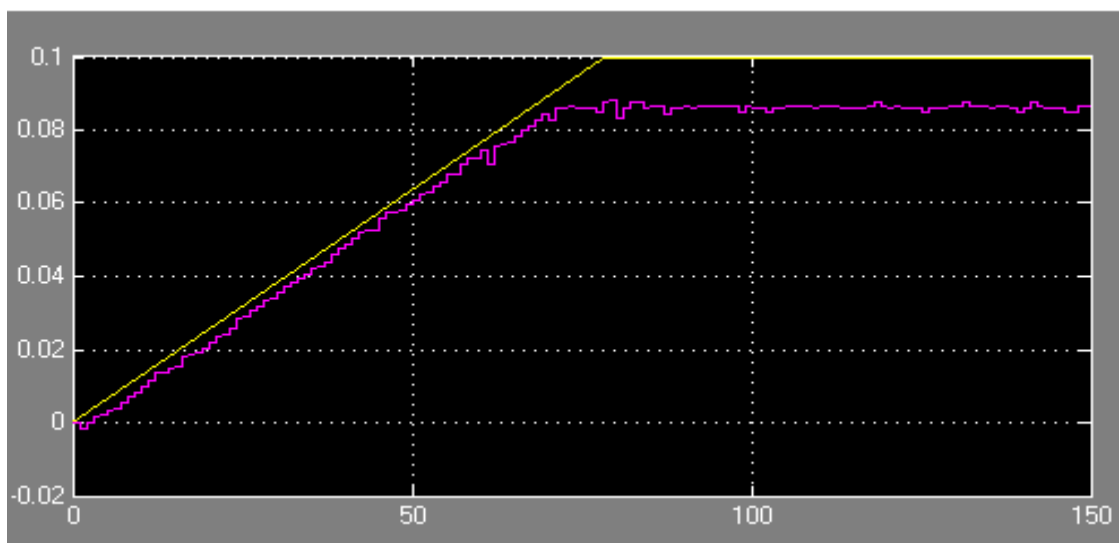
N	Datos del modelo	Datos reales
1	0.08800000	0.07710000
2	0.07500000	0.06520000
3	0.06200000	0.05200000
4	0.05000000	0.03800000
5	0.03600000	0.02600000
6	0.02400000	0.01460000
7	0.00800000	0.00200000
8	0.00000000	0.00100000
9	0.00000000	0.00080000
10	0.00000000	0.00080000

Luego:

FIT=69.8446 %. En este caso se puede apreciar el error en las curvas es mayor propio de las variaciones de las condiciones iniciales apreciadas en los datos tomados del experimento luego de un cierto tiempo (días) de actividad, por lo que el porcentaje de

ajuste ha disminuido debido a que el desarrollo y nutrición de las plantas ha provocado una disminución en el nivel del líquido.

La gráfica 3.4 muestra el comportamiento de las curvas del frasco de vitroplantas para estas nuevas condiciones iniciales:



Gráfica 3.4: Superposición de las curvas cuando han cambiado condiciones iniciales

Donde:

Amarillo: La curva analítica del frasco de vitroplantas para el proceso de llenado luego de varios días de funcionamiento del experimento.

Rosado: La curva experimental del frasco de vitroplantas para el proceso de llenado luego de varios días de funcionamiento del experimento.

Para el caso del frasco de vitroplantas luego de estar funcionando el experimento tenemos un juego de valores tomados para el cálculo del porcentaje de ajuste, el cual se muestra a continuación:

Tabla 3.3: Tabla de valores para el cálculo del por ciento de ajuste:

N	Datos del modelo	Datos reales
1	0.01250000	0.01000000
2	0.02550000	0.02200000
3	0.03800000	0.03600000
4	0.05100000	0.04900000
5	0.06350000	0.06100000
6	0.07600000	0.07500000
7	0.08900000	0.08200000
8	0.10000000	0.08700000
9	0.10000000	0.08700000
10	0.10000000	0.08700000

Luego:

FIT =72.0262 %. En este caso para el frasco de vitroplantas el porcentaje de ajuste de las curvas experimentales y analítica ha disminuido propio como decía anteriormente de las variaciones en las condiciones iniciales, sin embargo las curvas para el frasco de vitroplantas van a mostrar un mayor ajuste que para el caso del frasco de medio.

Es válido aclarar que en ambos casos se muestra la eficacia del modelo neumático, sin embargo a medida que el experimento se mantiene mas tiempo en funcionamiento el error va aumentando proporcionando de esta forma que el modelo no se ajuste en un momento dado a las exigencias impuestas por el modelo en tiempo real.

Para el proceso de vaciado las curvas analíticas se comportan del mismo modo que las experimentales por lo que podemos plantear que el modelo se acerca a la realidad de lo que sucede durante la puesta en marcha del experimento.

3.2.- Estudio de factibilidad.

Económica: El proyecto desarrollado posee un balance económico favorable basado en su relación costos – beneficios y teniendo en cuenta el impacto en su función final. La ejecución de este trabajo requiere la realización de inversiones iniciales, aunque no con valores excesivamente elevados. Además ubicando una tabla de costos y enfatizando en la relación entre precios y beneficios que proporciona obtendremos una gama de utilidades que especifican que el modelo propuesto merece la pena aplicarlo a todas las entidades que trabajen con Biorreactores de Inmersión Temporal.

Técnica: Tanto investigadores biólogos y productores cuentan con tecnologías necesarias para su confección y posterior ejecución, además por la importancia del proyecto atribuida principalmente a la importancia del desarrollo de investigaciones aplicadas a la automatización de procesos biológicos y su aporte práctico, se considera el mismo técnicamente factible.

A continuación se muestra una tabla reflejando el valor de cada uno de los componentes utilizados para obtener finalmente un balance económico técnicamente cuantificable.

Tabla 3.1 Precios de los componentes utilizados para la conexión de un experimento.

Pos	Descripción	Fabricante	Código	Cant	Precio unit. Euro	Total (Euro)
1	Tubo de 10 mm	SMC	TU1075G-20	1	078.95	078.95
2	Válvula solenoide	SMC	SY5420-5DZ-01F	1	210.53	210.53
3	Unión Tee	SMC	KQ2T10-00	2	018.42	036.84
4	Válvula manual a llave	SMC	VM120-01-36	1	085.53	085.53

Tabla 3.1 Precios de los componentes utilizados para la conexión de un experimento (continuación)

5	Sensor transductor de presión	Trafag	308024-115	1	051.00	051.00
TOTAL						462.85

3.3 Análisis viable del proyecto:

El análisis de viabilidad del proyecto es indispensable, aquí se define si el sistema a implementar es o no rentable, evitándose así la pérdida de tiempo y gastos de recursos innecesariamente.

Una aproximación iterativa en el desarrollo permite juzgar pronto la viabilidad del proyecto. Los proyectos que no son viables pueden detenerse en una fase temprana, ya que nadie disfruta trabajando en proyectos que parecen imposibles.

En la fase inicial, se realizaron toda una serie de pasos con vista a establecer un criterio de viabilidad del proyecto, lo cual es esencial para poder asumirlo o no:

- ✓ Se identificaron y eliminaron los riesgos críticos para la elaboración del sistema.
- ✓ Se analizó y diseñó una arquitectura candidata, a partir del desarrollo de un subconjunto clave de los requisitos, pasando por el modelado de los casos de uso.
- ✓ Se realizó una estimación inicial de coste, esfuerzo, calendario y calidad del producto con límites amplios.

La viabilidad y el análisis de riesgos están relacionados, ya que si el riesgo del proyecto es alto, la viabilidad de modelar el sistema neumático con calidad se reduce, para lo cual se tuvo en cuenta la:

- ✓ **Viabilidad económica:** Se realizó una valoración inicial de costes/beneficios, el cual significa una valoración de la inversión económica comparado con los beneficios que se obtendrán en la comercialización y utilidad del producto o sistema.
- ✓ **Viabilidad Técnica:** Se evaluaron los principios técnicos del sistema y al mismo tiempo se recogió información adicional, tentativa, sobre el rendimiento, fiabilidad, características de mantenimiento y productividad.

Los resultados obtenidos a partir del análisis técnico realizado, permitieron determinar la continuación del proyecto, fueron eliminados los riesgos de que no funcionara, se hizo un estudio para lograr que el sistema tenga el rendimiento deseado.

3.4 Conclusiones del capítulo

- La validación del modelo neumático en los Biorreactores de Inmersión Temporal permitió corroborar los resultados y demostrar que el modelo propuesto cumple con todos los requisitos que impone el modelo real, no obstante se ajusta a él y proporciona la confirmación de los resultados sin tener que ser presenciado particularmente, sino que permite la visualización a través de una PC aportando mayor conformidad, calidad de la plantas y verificación de los resultados obtenidos.
- El error calculado permitió afirmar con toda seguridad que el modelo propuesto es efectivo, ya que un error muy pequeño confirma que el modelo esta muy cercano a la realidad por lo que se considera propicio y de fácil entendimiento para que los investigadores biólogos y productores puedan utilizarlo para la obtención del modelo general.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con la demostración de la eficacia del modelo neumático en Biorreactores de Inmersión Temporal, se satisfizo todos los objetivos planteados, quedando expresado a modo de conclusión algunos aspectos importantes a vencer en la realización de este proyecto.

1. Con el diseño, modelado, simulación y validación del sistema se logró obtener un modelo neumático para controlar y supervisar el proceso de llenado y vaciado de los frascos, permitiéndole a los investigadores biólogos y productores obtener el modelo neumático general para la visualización del crecimiento y evolución de la plantas.
2. El modelado del sistema neumático contribuyó a la conservación del medio ambiente y de la naturaleza, posibilitando así un bienestar y mayor confort de las plantas, ya que se pueden sustentar sin tener que maltratarse por el sol o el aire, además impide que pueda estar más tiempo del debido inmerso en la concentración del *Murashige-skoog*, además se obtendría una verificación constante del comportamiento del nivel y por consiguiente de la nutrición y evolución de las plantas
3. Se consiguió establecer un balance coste-beneficios efectivo para obtener un modelo práctico pero a la vez económico que propicie adquirir los componentes para el montaje y puesta en práctica con mucho más facilidad.

Recomendaciones

Se recomienda a todos los que de una forma u otra tengan mucho en común con este proyecto dentro de sus investigaciones.

1. Que este trabajo sea el comienzo para la realización de posteriores investigaciones donde basándose en este modelo se logre obtener variaciones de parámetros influyentes en el sistema.
2. Que con este trabajo se logre un modelo más completo donde se logre presenciar la variación del nivel del líquido durante la puesta en marcha del experimento, así como la variedad de frascos (frascos de diferentes tamaños dentro de un mismo experimento).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitken-Christie, J. (1991). Micropropagation: Technology and Application. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, pp363-388.
- Aström, K. J. and T. Bohlin (1965). Numerical identification of linear dynamic systems from normal operating records. IFAC Symposium on Self-Adaptive Systems. Teddington, England.
- Belgharbi, M., D. Thomasset, et al. (1999). Analytical model of the flow stage of a pneumatic servo-distributor for simulation and nonlinear control. Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland.
- Brun, X., M. Belgharbi, et al. (2000). "Control of an electropneumatic actuator, comparison between some linear and nonlinear control laws." Journal of Systems and Control Engineering(Control in Fluid Power Systems).
- Burrows, C. R. (1972). Fluid Power Servomechanisms. London, England, Van Nostrand.
- Cazzulino, D., H. Pedersen, et al. (1991). Bioreactors and image analysis for scale-up and plant propagation. En: Scale-Up and automation in plant propagation. 1, 4, I. K. Vasil (Ed.). Florida, EUA. Florida, EUA.
- Eykhoff, P. (1981). Trends and progress in system identification. Oxford, UK, Pergamon Press.
- Forssell, U. (1999). Closed-loop identification: methods, theory, and applications. Department of Electrical Engineering. Linköping, Sweden, Linköping University. **Ph.D.**
- Fujita, N. and A. Kinase (1991). The use of robotic in automated plant propagation. Florida, EUA.
- González, D. G. (2004). Estudio sobre el comportamiento de las condiciones ambientales y sus efectos en la micropropagación de plantas. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Ciego de Avila, Marta Abreu de Villa Clara. **Ingeniero**.
- Gulati, N. and E. Barth (2005). Non-linear pressure observer design for pneumatic actuators. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.
- Gupta, P. K., R. Timmis, et al. (1991). Development of an embryogenesis system for automated propagation of forest trees. Florida, EUA.

- Janiszowski, K. B. (2004). "Adaptation, modelling of dynamic drives and controller design in servomechanism pneumatic systems." IEE Proceedings - Control Theory and Applications **151**(2): 234-245.
- JC.Aceves and J. Hernández (1997). "Propagación comercial de plantas ornamentales por cultivo in vitro de tejidos vegetales para beneficio social de la comunidad." Universidad Veracruzana.
- Jimenez, B. L. M. (2007). Identificación borrosa de sistemas no lineales basada en un algoritmo de agrupamiento incremental con aplicación a un proceso biotecnológico. Departamento de Automatica y Sisteamas Computacionales. Villa Clara, Marta Abreu de Villa Clara. **Doctor en Ciencias Técnicas**: 132.
- Kalman, R. E. (1960). "Contributions to the theory of optimal control." Bol. Soc. Mat. Mex. **5**: 102-119.
- Kalman, R. E. (1964). "When is a control system optimal?" American Society of Mechanical Engineers Transactions, Series D: Journal of Basic Engineering **86**: 1-10.
- Karpenko, M. and N. Sepehri (2006). QFT synthesis of a position controller for a pneumatic actuator in the presence of worst-case persistent disturbances. IEEE American Control Conference.
- Kawashima, K., T. Funaki, et al. (2003). Automated characteristic test bench of pneumatic servovalve. 7th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization.
- Kawashima, K., Y. Ishii, et al. (2004). Determination of flow rate characteristics of pneumatic solenoid valves using an isothermal chamber, Precision and Intelligent Laboratory, Tokyo Institute of Technology.
- Kirdmanee, C., Y. Kitaya, et al. (1995). Effects of CO2 enrichment and supporting material in vitro on photoautotrophic growth of eucalyptus plantlets in vitro and ex vitro,. Chiba, Japón.
- Kitaya, Y., T. Shibuya, et al. (1998). Effects of light intensity and air velocity on air temperature, water vapor pressure and CO2 concentration inside a plant canopy under an artificial lighting condition,. Chiba, Japón.
- Ljung, L. (1999). System Identification: Theory for the User. New Jersey, EE. UU., Prentice-Hall, Inc.
- Sagawa, Y. and J. T. Kunisaki (1990b)). Micropropagation of floricultura crops,. McGraw-Hill, Nueva York, EUA.
- Tressler, J. M., T. Clement, et al. (2002). Dynamic behavior of pneumatic systems. ICRA '02. IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, DC.

ANEXOS

Anexo I. FRASCOS DE CULTIVO



Anexo II. Modelo de la válvula

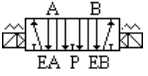
Despreciando la variación del flujo másico de aire durante el desplazamiento del carrete de la válvula en cada instante de tiempo, puede considerarse que este flujo es el mismo que en estado estacionario para las mismas condiciones de presión y área efectiva del orificio. De esta manera, el modelo de la válvula puede dividirse en dos partes. La primera, correspondiente a la dinámica del posicionamiento de su carrete, depende fundamentalmente del sistema electromecánico que emplee. La segunda corresponde al modelo de la característica estática del flujo de aire a través del orificio. El flujo de aire es función de la temperatura del aire, del área efectiva del orificio y de las presiones antes y después del mismo.

En este trabajo se emplea una válvula solenoide SMC-SY5420-5DZ-01F; por tanto, el modelo de la válvula sólo incluirá la característica estática del flujo de aire.

Para caracterizar el flujo de aire a través de los orificios de la válvula, se analiza primeramente el flujo de aire por un orificio de área variable, y luego ese análisis se extrapola a los orificios de la válvula.

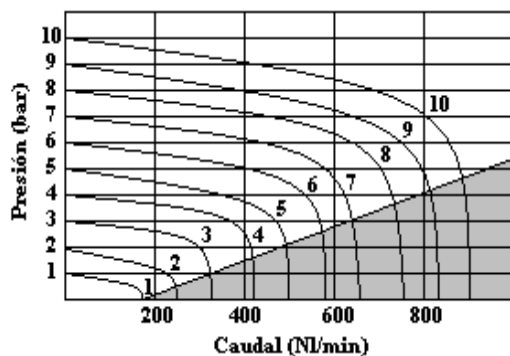
Anexo III. Válvula tipo SMC SY5420-5DZ-01F.

Forma de pedido

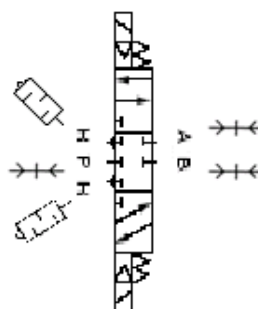
Accionamiento manual.	Tipo de válvula y función.	Símbolo.	Voltaje.	Salidas.	Caudal ^(*) (Factor Cv).
Accionamiento manual por pulsador sin enclavamiento.	5/3 centro a escape.		24 Vcc.	Roscas G1/8.	412 NI/min. (0.42)

^(*)Los datos de caudal se dan a una presión de alimentación de 6 bar y con una caída de presión de 1 bar al paso por la válvula.

Curvas de caudal.



Representación de la válvula solenoide.



Anexo IV. Información Técnica del Catálogo SMC

Coeficientes de caudal

Cuando el diagrama P/Q no está disponible o es insuficiente, y hay que realizar cálculos de caudal en función de la presión o recíprocamente en distribuidores, racores, tubo, etc., los coeficientes siguientes son de mucha utilidad:

• Factor kv

Factor de referencia sin unidades, obtenido por mediciones con flujo de agua. El kv es igual a 1 cuando un litro (1 dm³) de agua por minuto pasa por el elemento con una pérdida de carga de 1 bar.

• Factor Kv

Idéntica definición a la arriba expuesta, pero expresado en m³/h.

• Factor Cv

Utilizado en los países anglosajones, cuya definición es idéntica al

factor kv, y sus medidas son US-Gallons es decir a 60OF (15,6OC) con una pérdida de carga de 1 PSI.

• Factor f

Idéntica definición al factor Cv, cuya medida es en Imperial-Gallons.

• Sección equivalente S (mm²)

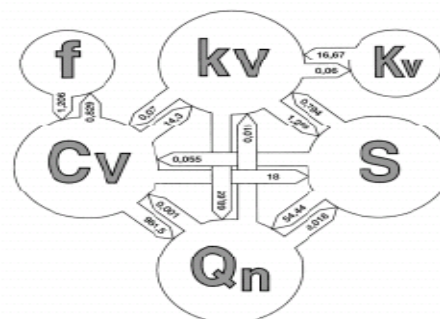
Este factor, permite representar una válvula o un conjunto de elementos montados en

serie, asimilándolo a un orificio en pared delgada situado en una conducción, y que provoca la misma restricción en el fluido (caudal y pérdida de carga) que el conjunto de elementos considerados.

Esta magnitud comprobada para todos los componentes SMC, e incluso para los racores, presentan la gran ventaja de estar referidos al aire comprimido y no al agua, lo cual permite calcular estas pérdidas de carga o los caudales resultantes que pasan a través de una cadena de componentes, con una precisión buena.

Esta dimensión está expresada en mm².

Conversión entre coeficientes



Unidades	S mm ²	kv dm ³ /mn	KV m ³ /h	Cv US-Gal.	f Imp-Gal.
S	1	0,794	0,048	0,055	0,048
kv	1,259	1	0,06	0,07	0,058
Kv	20,979	16,667	1	1,166	1,035
Cv	18	14,3	0,858	1	0,829
f	21,7	17,243	0,967	1,206	1

Caudal nominal Qn

El caudal nominal Qn corresponde al caudal de aire que puede pasar por un aparato a 0°C, a una presión de entrada de 6 bar, y una presión de salida de 5 bar. Este dato, el mismo que figura en esta documentación, no es más que una indicación aproximada que permite realizar los cálculos. En efecto, los métodos de medida del Qn, son muy variables, amén de los parámetros exteriores tales como temperatura, presión atmosférica, etc.

$$Q_n = 54,44 \times S$$

Cálculo del caudal

1 Aplicaciones neumáticas clásicas:

$$\text{si } P_2 + 1,013 \leq P_1 + 1,013 \leq 1,89 (P_2 + 1,013)$$

$$\text{Utilizando "S"} \quad Q = 22,2 \times S \sqrt{\Delta P (P_2 + 1,013)} \times \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}}$$

$$\text{Utilizando "Cv"} \quad Q = 400 \times Cv \sqrt{\Delta P (P_2 + 1,013)} \times \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}}$$

2 Aplicaciones para gran caudal:

$$\text{si } P_1 + 1,013 \geq 1,89 (P_2 + 1,013)$$

$$\text{Utilizando "S"} \quad Q = 11,1 \times S (P_1 + 1,013) \times \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}}$$

$$\text{Utilizando "Cv"} \quad Q = 200 \times Cv (P_1 + 1,013) \times \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}}$$

Q = Caudal (NI/min)

P₁ = Presión de alimentación (bar)

P₂ = Presión de salida (bar)

ΔP = P₁ - P₂

S = Sección equivalente (mm²)

θ = Temperatura de fluido (°C)

Cv = Factor Cv

Anexo V. Tabla de Especificaciones de los Componentes utilizados

Componente	Código	Fabricante	Imagen
Tubo de 10mm	T1075BU-20	SMC	
Unión Tee	KQ2T10-00	SMC	
Válvula manual a llave	VM120-01-36	SMC	
Sensor-Transductor de presión	308024-115	TRAFAG	