



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo híbrido para la dosificación automática de nutrientes en un sistema aeropónico

José Nicanor Estrada Salazar

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia

2019



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Hybrid model for automatic dosing of nutrients in an aeroponic system

José Nicanor Estrada Salazar

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia

2019

Modelo híbrido para la dosificación automática de nutrientes en un sistema aeropónico

José Nicanor Estrada Salazar

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:

PhD. German Darío Zapata Madrigal

Codirector:

PhD. Darío Antonio Castañeda Sánchez

Línea de investigación en automatización

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2019

A mi familia

Agradecimientos

Con admiración y respeto manifiesto un agradecimiento especial Al Dr. German Darío Zapata Madrigal, su dirección representó un apoyo incondicional por su experiencia, compromiso, dedicación, perseverancia y conocimiento brindado en todo este tiempo, cualidades que hicieron posible la culminación de mi tesis con éxito.

Agradezco de igual forma Al Dr. Darío Antonio Castañeda Sánchez, por su valiosa asesoría, consejos y aportes que fueron claves para el desarrollo de este trabajo.

A la Ingeniera Eliana Carrasco Correa (QEPD), por su constante disposición y voluntad para brindar apoyo al desarrollo de las pruebas.

Al Ingeniero Ramiro García Velilla por su gran colaboración y aporte para el desarrollo del montaje, pruebas y ensayos del diseño de sistema aeropónico.

Así mismo infinitas gracias a SIMAC y a la facultad de Ciencias Agrarias por el apoyo brindado, y permitirme hacer uso de sus instalaciones para el desarrollo de las pruebas y ensayos, las cuales dieron continuación y revisión a los avances del proyecto.

Y finalmente a La Universidad Nacional de Colombia, a quien le debo mi formación profesional

Resumen

Los desarrollos tecnológicos en automatización y control son aplicados en la mayoría de los procesos productivos, avances que no son ajenos en la agricultura tecnificada; retos que se imponen a las generaciones actuales y futuras para contribuir de manera decidida a la sostenibilidad del planeta. Las nuevas técnicas avanzadas de cultivos como “Cultivos sin suelo”, pueden hacer aportes significativos a este propósito, por medio de tecnologías de la automatización y control, que posibilitan a estos avances hacer control sobre las variables que inciden en las diferentes fases del proceso agrícola. Esta propuesta plantea el desarrollo de un modelo autómatas de dosificación que describa y optimice el comportamiento de la frecuencia de dosificación nutricional, en función de la producción de biomasa de la planta, medido con la acumulación de grados día en cada etapa fenológica para un cultivo de hortaliza. De esta manera se garantiza la optimización de la nutrición con relación al buen crecimiento y producción del cultivo. Para la solución de este modelo, se emplean formalismos de sistemas a eventos discretos como la teoría de autómatas y las redes de Petri.

Los conceptos planteados se validan por medio de la aplicación de herramientas como Supremica para autómatas y CPN Tools para redes de Petri; además de la implementación del modelo en controladores lógicos programables (PLC) y físicamente en un sistema aeropónico, que da como resultado la identificación de un rango de frecuencia de dosificación para el cultivo de *Eruca sativa* (rúcula).

Palabras clave: Autómata híbrido jerárquico, sistema híbrido, Aeroponía, modelo aeropónico, redes de Petri jerárquicas, dosificación automática.

Abstract

The technological developments in automation and control are applied in the majority of the productive processes, advances that are not alien in the technified agriculture; challenges that are imposed on current and future generations to contribute decisively to the sustainability of the planet. The new advanced techniques of crops such as "crops without soil", can make significant contributions to this purpose, through automation and control technologies, which enable these advances to control the variables that affect the different phases of the agricultural process. This proposal proposes the development of an automaton dosage model that describes and optimizes the behavior of the frequency of nutritional dosage, based on the production of biomass of the plant, measured with the accumulation of degrees day in each phenological stage for a vegetable crop. In this way the optimization of the nutrition in relation to the good growth and production of the crop is guaranteed. For the solution of this model, formalities of discrete event systems are used, such as the theory of automata and the Petri nets.

The proposed concepts are validated through the application of tools such as Supremica for automata and CPN Tools for Petri nets; in addition to the implementation of the model in programmable logical controllers (PLC) and physically in an aeroponic system, which results in the identification of a frequency range of dosing for the cultivation of *Eruca sativa* (rocket salad).

Keywords: Hierarchical hybrid automaton, hybrid system, aeroponics, aeroponic model, hierarchical Petri nets, automatic dosing.

Índice general

	Pág.
Resumen	XI
Índice de figuras.....	XVII
Índice de tablas	XIX
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes y justificación	1
1.2 Problema de investigación	6
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Aporte	7
1.5 Organización del trabajo.....	7
2. Aeroponía	9
2.1 Sistemas aeropónicos.....	9
2.2 Solución nutritiva y concentración	13
2.3 Dosificación de nutrientes	16
2.4 Suministro de agua	16
2.5 Grados día.....	17
2.6 PH y Conductividad.....	17
2.7 Crecimiento y desarrollo de las plantas.....	19
3. Herramientas y formalismo de sistemas híbridos	21
3.1 Sistema a eventos discretos (DES).....	22
3.2 Redes de Petri (PN) y Autómatas de estado finito (FSA).....	22
3.3 Redes de Petri (PN)	23
3.3.1 Propiedades	26
3.4 Autómata de estado finito como red de Petri.....	27
3.4.1 Teoría de lenguajes y autómatas.....	28
3.5 Autómata finito	29
3.5.1 Lenguaje generado por autómatas	30
3.5.2 Propiedades	31
3.6 HHA: Autómata híbrido jerárquico	31
4. Propuesta de modelamiento aeropónico.....	33
4.1 Modelo propuesto.....	33

4.1.1	Proceso de dosificación nutricional.....	35
4.1.2	Modelación del sistema aeropónico.....	35
4.2	Componentes continuas	42
4.3	Componentes discretas	42
4.4	Modelamiento de componentes continuas	42
4.5	Modelamiento de componentes discretas	45
4.5.1	Estado de desarrollo y crecimiento.....	45
4.5.2	Estado de cambio horario.....	46
4.5.3	Estado sistema de dosificación	46
4.6	Especificación de componentes continuas.....	46
4.7	Especificaciones de componentes discretas	47
4.8	Autómata híbrido jerárquico	48
4.9	Modelo de autómata jerárquico.....	52
4.10	Modelo red de Petri jerárquico (HPN)	53
4.11	Análisis del sistema híbrido.....	57
4.11.1	Análisis de propiedades	61
4.11.2	Red limitada:	63
4.11.3	Red segura:.....	63
4.11.4	Red viva:	63
4.12	Conclusiones	66
5.	Implementación.....	67
5.1	Implementación en PLC.....	67
5.2	Diseño experimental	70
5.2.1	Evaluación del experimento.....	71
5.2.2	Análisis estadístico.....	72
5.2.3	Resultados y discusión.....	73
5.2.4	Acumulación de grados día para la rugula.....	79
5.3	Conclusiones	80
6.	Conclusiones y trabajos futuros.....	83
6.1	Conclusiones	83
6.2	Trabajos futuros.....	84
	Anexo A: Modelo de red de Petri jerárquico (HPN)	87
	Anexo B: Programa en TIA portal para la representación del autómata frecuencia de dosificación nutricional.....	93
	Bibliografía	107

Índice de figuras

	Pág.
Figura 2.1: Sistemas sin suelo. Tomado de [15].....	11
Figura 2.2: Patentes de sistema aeropónico. A) sistema horizontal [77], B) sistema vertical [78].....	11
Figura 2.3: Implementación sistema aeropónico producción horizontal. A) Cultivo de rugula, B) Camas de sistema aeropónico.....	12
Figura 2.4: Sistema aeropónico de producción vertical. Citado por [15]	13
Figura 3.1: Estructura de relación entre autómatas y redes de Petri. Fuente [94].....	28
Figura 4.1: Proceso de dosificación nutricional en medio aeropónico (fuente propia)	34
Figura 4.2: Ciclo de riego para la <i>i</i> -ésima etapa.....	38
Figura 4.3: Cambio Día-Noche, Noche-Día	38
Figura 4.4: Etapas fenológicas expresadas por el cambio de <i>GDD</i>	39
Figura 4.5: Modelo propuesto de dosificación nutricional	41
Figura 4.6: Estado de crecimiento y desarrollo	46
Figura 4.7: Jerarquización de estados del modelo.....	50
Figura 4.8 : Modelo de autómata híbrido jerárquico de la frecuencia de dosificación	52
Figura 4.9: Modelo de red Petri (PN)	54
Figura 4.10: Red de Petri jerárquica (HPN) del modelo propuesto	55
Figura 4.11: Subredes de la HPN.....	56
Figura 4.12: A- Modelo de autómata finito para las etapas de desarrollo B- Estados aceptados para el modelo (generados por <i>supremica</i>).....	57
Figura 4.13: A- Modelo de autómata finito para para el cambio de Día a Noche B- Estados aceptados para el modelo (generado por <i>supremica</i>).....	59
Figura 4.14: A- Modelo de autómata finito para la frecuencia de dosificación B- Estados aceptados para el modelo (generado por <i>supremica</i>).....	60
Figura 4.15: Árbol de alcanzabilidad del modelo HPN	65

Figura 5.1: Rutina principal para el cambio entre las etapas	68
Figura 5.2: Rutina para cada etapa de desarrollo del cultivo	68
Figura 5.3: Subrutina cambio de Día-Noche	69
Figura 5.4: Subrutina frecuencia de dosificación (TR, TD)	70

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 2.1: Elementos necesarios que debe tener la solución nutritiva para el desarrollo de las hortalizas	14
Tabla 2.2: Fertilizantes comerciales para la preparación de soluciones nutritivas. Tomado de [83]	15
Tabla 2.3: Concentración de elementos minerales esenciales. Tomado de [83].....	16
Tabla 2.4: pH óptimo para algunos vegetales. A) Rangos de pH óptimos; B) Escala de acidez de pH. Citado por [18]	18
Tabla 4.1: Lugares del modelo HPN.....	64
Tabla 5.1: Factores y niveles para la evaluación	71
Tabla 5.2: Valores de los tiempos de riego y descanso evaluados	71
Tabla 5.3: Tratamientos evaluados.....	72
Tabla 5.4: Valores de lambda, factor de transformación.....	73
Tabla 5.5: Biomasa foliar	74
Tabla 5.6: Biomasa radicular	75
Tabla 5.7: Análisis de varianza para peso fresco foliar de los 9 tratamientos	76
Tabla 5.8: Análisis de varianza para biomasa seca foliar	77
Tabla 5.9: Análisis de varianza para biomasa seca foliar y radicular	78

1.Introducción

En este apartado se presenta la introducción al tema de la tesis. Se hace una revisión de la literatura sobre el uso de la Aeroponía en hortalizas, junto con el modelo de autómatas híbridos; seguido se plantea el problema de investigación con los objetivos que impulsaron el desarrollo del trabajo. Finalmente se presenta el aporte y la organización del documento.

1.1 Antecedentes y justificación

La Aeroponía es un sistema tecnológico que en los últimos diez años ha tenido una alta proyección agrícola a través de los sistemas sin suelo. Su innovación hace que esta técnica proporcione un adecuado desarrollo al sistema radicular de los cultivos bajo invernadero, presentando un alto rendimiento y desarrollo; en comparación con los cultivos tradicionales [1]. Los sistemas sin suelo son métodos que posibilitan en las plantas un crecimiento flexible permitiendo al cultivador un control total sobre el ambiente de crecimiento, incluyendo la zona radicular, con una tendencia a incrementar la eficiencia del uso de agua, conservando así mismo su calidad y apoyando la agricultura ecológica [2].

La palabra Aeroponía se deriva de los términos griegos Aero (aire) y ponos (trabajo), siendo una técnica de sistema (agrícola) que se desarrolla en forma aérea. Es una tecnología limpia, ecológica, con alta productividad y eficiencia; tiene la tendencia a conservar el agua y la energía, donde las raíces se mantienen suspendidas en el aire, aprovechando el espacio vertical para el suministro de nutrientes en un ambiente oscuro saturado con una solución nutritiva entregada por sistemas de microaspersión en intervalos de tiempos, simulando las condiciones del suelo [3]. Estos sistemas aeropónicos prometen un gran desarrollo para la agricultura urbana, ofreciendo una trazabilidad y homogeneidad de la producción de hortalizas en los cultivos. Las primeras investigaciones en sistemas aeropónicos fueron plasmadas en el artículo “A method of growing plants in water vapor to facilitate examination of roots” citado por [4], donde se plantea una forma

fácil para el estudio de la zona radicular de las plantas con vapor de agua; posteriormente en el año 2006 los sistemas aeropónicos son utilizados en la agricultura como medios de investigación y producción sostenible, amigable con el medio ambiente [5].

En la actualidad es un tema de gran interés en las diferentes investigaciones de producción de hortalizas tanto por la calidad del producto como por el alto rendimiento de producción. Las principales investigaciones de Aeroponía en hortalizas están enfocadas en la producción de papa [6]–[10] y en la optimización del sistema aeropónico [11]–[16]; además de investigaciones en torno a la nutrición y control de variables como el pH y la conductividad [17], [18]. Todas estas investigaciones han hecho importantes aportes en torno a la producción, uso de insumos y evaluación del sistema, convirtiéndola en una técnica adecuada para su replicabilidad e investigación en diferentes cultivos de hortalizas. La vinculación directa con nuevos estudios, posibilita un mayor acercamiento para el entendimiento de la interacción continua de las diversas variables, tanto abióticas como bióticas de un ser vivo (planta) y un método de producción sin suelo (Aeroponía).

En cuanto al crecimiento y desarrollo de las plantas se han realizado modelos a partir de la acumulación de grados día como los expresados en [19], y [20], dado que la temperatura es uno de los parámetros más influyentes en los procesos fisiológicos de las plantas [21], siendo una metodología empleada para modelar la fenología de un cultivo [22]. Estos modelos han sido estudiados en diferentes cultivos, como el de rosas [23], frijoles, papa [24], [19], entre otros [20], [25], todos en sistemas tradicionales. Uno de los pocos estudios en aeroponía expuesto en este ámbito, se presenta en [26], que establece el cálculo de acumulación de grados día (GDD) como la base para estimar la fecha de siembra, cosecha y el desarrollo en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.).

Para la modelación de un cultivo de hortalizas bajo un sistema aeropónico se pueden evidenciar principalmente tres macro etapas de desarrollo y crecimiento de las plantas [27], estas se presentan de manera secuencial con el cambio en la acumulación de grados día. Dentro de cada etapa interactúan diferentes factores que determinan su estado de crecimiento y desarrollo, como lo es el clima, la dosificación nutricional tanto para el día como la noche, y la nutrición requerida de acuerdo a su estado de crecimiento; además de un buen manejo fitosanitario y control cultural del cultivo. Todo lo anterior indica que se tiene una vinculación y correlación directa e indirecta de los factores con el estado de

crecimiento de las plantas bajo dicho sistema, lo que permite valorarlo como un sistema dinámico discreto (etapas de crecimiento) con vínculo en variables continuas.

Los sistemas de producción agrícola incluyen eventos continuos y discretos en sus procesos, los cuales están continuamente influenciados por las condiciones climáticas, factores biológicos, plagas y enfermedades, manejo agronómico, aspectos económicos, varios factores bióticos, pero en especial los abióticos, cuyos efectos sobre la producción, debido a su misma variación, no son constantes en el espacio ni en el tiempo. Los sistemas aeropónicos prometen hacer mejoras contra los patógenos transmitidos por el suelo en los cultivos [28], sin embargo, al incursionar una nueva técnica de producción sin suelo, se adicionan nuevos parámetros y factores que son vitales para el buen desempeño de un cultivo bajo este sistema, sin contar con las diferentes interacciones entre cultivo-sistema y atmósfera.

Por todo lo anterior nace la necesidad de buscar formalismos para modelar el sistema que permitan entenderlo. A partir de esta necesidad de modelar procesos donde hay intervención de muchas variables, es posible presentar formalismos como los sistemas híbridos que son apropiados para tratar las interacciones entre eventos continuos y discretos en las diferentes operaciones agrícolas.

Los sistemas dinámicos con vínculos de variables discretas y continuas, se pueden tratar como sistemas híbridos, de los cuales existen varios formalismos tanto para el área continua como la discreta. Para tal caso se tratará con formalismos como los autómatas híbridos jerárquicos y/o redes de Petri jerárquicas bajo la hipótesis que pueden modelar apropiadamente el dinamismo de la dosificación nutricional del sistema aeropónico en la producción de hortalizas.

Los sistemas híbridos son una combinación de dos sistemas dinámicos: los sistemas continuos definidos por ecuaciones diferenciales, y los sistemas de eventos discretos definidos por autómatas [29], [30]. El primer estudio realizado del sistema híbrido fue presentando por Witsenhausen [31], como un sistema de tiempo continuo con parte continua y discreta. En 1979 Cellier [32] propone el concepto y la estructura de un sistema híbrido como un conjunto de partes discretas, continuas, y de interfaz. Pero es hasta los años 90 donde crece el interés por el estudio de sistemas híbridos, introduciéndose el formalismo (autómata híbrido) para el estudio y análisis de estos sistemas [33], [34]. Cruz *et al.* [35] expresan, que una de las razones para el uso de sistemas híbridos en la

interpretación del comportamiento dinámico de sistemas, radica en la reducción de la complejidad del modelo en orden.

El concepto de autómatas híbridos representa un formalismo que lo describe, permitiendo modelar la parte discreta con autómatas finitos, y el comportamiento continuo con ecuaciones diferenciales de bajo orden que aproximan el comportamiento real del sistema [36]. El formalismo para autómatas híbridos fue expuesto por Henzinger [37], su aplicación se vio reflejada en el desarrollo de una metodología con el uso de autómatas híbridos que permite diseñar planes de vuelos aéreos no tripulados [38]. Hoy en día las aplicaciones han incursionado en diferentes áreas como las ciencias computacionales e ingeniería [30], sistemas biológicos [39], procesos y actividades agrícolas (ingeniería de biosistemas) [40], [41]. En esta última área la mayoría de las investigaciones están enfocadas en el uso práctico para la solución de problemas puntuales del sector agrícola con la ayuda de redes de Petri u otras herramientas (con fines de control), como las propuestas para la automatización de un sistema hidropónico controlando el pH, conductividad, temperatura y oxígeno, a nivel de laboratorio [42], [43]. Así mismo el sistema de monitoreo y control para la distribución de agua y nutrientes en un sistema de cultivo aeropónico para la producción de papa prebásica [44], también en la evaluación de un sistema hidropónico con un control automatizado basado en un modelo de lógica difusa [16], y el uso del Internet de las cosas (IoT) para el monitoreo continuo, análisis y registro de datos de las variables abióticas en la entrega de nutrientes de forma nebulizada en medio aeropónico [45], [46].

En cuanto a investigaciones para la industria, se referencian algunos trabajos que presentan estudios de autómatas híbridos y aplicaciones, tales como el modelado para la producción limpia de H₂ a partir de sistemas de conversión de energía solar y eólica [47], la determinación de fechas límite y períodos de procesos críticos a lo largo del tiempo de sistemas que operan en tiempo real [48], además la propuesta metodológica para el modelado y análisis de sistemas híbridos, el caso de estudio sistemas de tanques [36], el sistema de control automatizado para la altura de la suspensión neumática en un vehículo [49], y por último, la modelación de un sistema de llenado de botellas [50]. En la actualidad la teoría de los autómatas híbridos y la teoría de la red de Petri son los principales métodos de investigación de sistemas híbridos [33]. Puesto que dentro de estos se encuentran los formalismos de autómatas híbridos lineales, autómatas híbridos temporizados, autómatas híbridos jerárquicos, entre otros, además de las redes de Petri que cuenta principalmente con las

redes de Petri híbridas [51], coloreadas [52] y jerárquicas como las más apropiadas para el planteamiento y solución de sistemas complejos.

Con respecto a la redes jerárquicas, en [53] se presentó un modelo matemático para control del comportamiento de sistemas multiagentes (MAS) como una solución a sistemas que presentan alta complejidad entre los agentes y la dinámica del medio. Los sistemas híbridos jerárquicos (HHA) son presentados en diferentes aplicaciones como una extensión del formalismo de autómatas híbrido (HA) que sirven para modelar y representar el dinamismo de sistemas [54]–[57]; “Estos permiten evaluar métodos complejos con diferentes niveles de abstracción, proporcionando una forma de analizar el comportamiento de los sistemas modelados” [55], lo que admite que las especificaciones de jerarquía de estos sistemas híbridos se puedan transformar en autómatas híbridos finitos.

El concepto de redes jerárquicas se deriva de la teoría de las redes de Petri, desarrollada por Carl Petri en su trabajo de doctorado en 1962, donde definió un modelo matemático general para describir las relaciones existentes entre los eventos y las condiciones [58]. En 1980-1985 Silva en su primera publicación del libro “Las redes de Petri en la automática y la informática” [59], establece los conceptos y formalismos que permiten expresar de forma clara, y rigurosa sistemas secuenciales, paralelos o concurrentes; posicionándose como una herramienta idónea para el modelado de sistemas discretos por su representación gráfica, formalismo, y robustez estructural. Las redes jerárquicas parten como una extensión de las redes de Petri, usadas en modelos complejos con manejo elevado de variables, permitiendo dividir ese modelo complejo en subredes y módulos a través de la jerarquización, que consiste en la fusión de lugares y la sustitución de transiciones; además de la reusabilidad y modulación, logrando una estructura generalizada del modelo.

Un aspecto importante tanto para las redes de Petri como para los autómatas es la posibilidad de validez del modelo por medio de propiedades que permiten verificarlos, para esto han desarrollado diferentes herramientas, de las cuales las más usadas para sistemas jerárquicos son UPPAAL [60], Hytech [61], chekmate, HRCLT [57], Hieromate [55], y programación lógica CLP[62], [54]; además de plataformas como Simulink, State Flow [63], [64] y CPN Tools, que permite la simulación y análisis de modelos [65].

1.2 Problema de investigación

Los sistemas aeropónicos constituyen un sistema tecnológico de producción de cultivos de bajo porte en invernadero sin el uso de suelo, donde las raíces se mantienen suspendidas en el aire, y aprovechan el espacio vertical para el suministro de nutrientes en un ambiente oscuro y saturado con una solución nutritiva entregada por sistemas de aspersion [3]. Estos presentan un gran potencial para la producción de hortalizas haciendo uso y conservación de los recursos naturales de forma eficiente, prometiendo una producción homogénea y constante en el tiempo [66]; además podría ser un factor importante para reducir las plagas y enfermedades producto del suelo, así como el uso de químicos para el control de las mismas. Todas esas bondades mencionadas permiten que se genere una sinergia entre la tecnología y el agro para la producción de hortalizas de manera inteligente, motivando tanto a productores como investigadores del sector a trabajar con estos sistemas. Sin embargo esta técnica presenta poca inmersión en el sector, debido a la escasa investigación que hay alrededor de ella, a pesar de que en los últimos 10 años a nivel mundial se ha visto un gran interés en esta forma de producción y se han logrado obtener muy buenos resultados en los cultivos, evaluando la evapotranspiración de la planta, la conductividad de la solución lixiviada, la solución [67], e intermitencia de la dosificación [68]. No obstante, la mayoría de estos sistemas evalúan parámetros ambientales sobre el suelo o sustrato y su efecto sobre la planta, con pocas contribuciones en el efecto del desarrollo de la raíz y la dosificación de nutrientes que puedan modelar mejor el crecimiento y desarrollo de las plantas, generando la posibilidad de extrapolar estos resultados en las demás hortalizas.

La propuesta de este trabajo de investigación fue evaluar la producción de hortalizas en un sistema aeropónico mediante el modelamiento de la dosificación nutricional para un cultivo de rúcula (*Eruca sativa*), disponiendo de una metodología formal de modelamiento para el comportamiento de la dosificación nutricional en el medio aeropónico, de esta manera brindar una herramienta que permita a los investigadores hacer evaluaciones e investigaciones en la determinación tanto de la dosificación nutricional, como de la nutrición requerida para cada etapa fenológica; además de servir como vía para mejorar la técnica, e introducir al mercado estos sistemas inteligentes de producción hortícola.

Tomando como base lo anterior, se presentan los siguientes objetivos para el desarrollo de esta investigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer un Modelo Híbrido para la dosificación automática de la solución nutritiva en el cultivo de rúcula (*Eruca sativa*) en un sistema aeropónico.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Plantear un Modelo para la dosificación nutricional de plantas de rúcula en sistemas aeropónicos.
- Desarrollar el automatismo del modelo de dosificación nutricional para las diferentes etapas fenológicas del cultivo.
- Determinar mediante la experimentación y simulación la dosificación de nutrientes en sistemas aeropónicos del cultivo de rúcula (*Eruca sativa*).

1.4 Aporte

Este trabajo presenta una propuesta de automatización para la frecuencia de dosificación nutricional en un sistema aeropónico. Centrándose en la concepción de modelos de autómatas jerárquicos, que brindan la posibilidad de reusabilidad de los modelos de software basados en modelos semánticos, logrando de esta manera se refleja transparencia, en el sentido de la ingeniería de software, y correlación entre el modelo aeropónico, el modelo jerárquico, el modelo de simulación y el modelo de software bajo norma IEC61131. La propuesta diseña un sistema completo de frecuencia de dosificación nutricional para producción de cultivos, con la flexibilidad para manejar n etapas fenológicas; además de ser útil para la estimación vía experimentación de los tiempos de dosificación nutricional de cualquier cultivo en un medio aeropónico.

1.5 Organización del trabajo

Este trabajo está organizado por capítulos, iniciando con la introducción. En el segundo capítulo se hace una descripción de la técnica aeropónica en hortalizas, presentando diferentes sistemas que favorecen el uso de esta tecnología, además de la descripción de las variables más influyentes.

En el tercer capítulo se presenta la selección de los formalismos de sistemas a eventos discretos que se trabajarán para el desarrollo de este trabajo. Comenzando con la definición de sistemas a eventos discretos y la aplicabilidad que tiene el uso de las redes de Petri y autómatas de estado finito, así como su definición formal. Finalizando con la definición formal de autómata híbrido jerárquico como eje central para esta propuesta.

En el capítulo 4 se propone el desarrollo del modelo aeropónico. Este consta del planteamiento e interpretación de la interacción de planta- sistema- ambiente para dar paso a la consolidación del modelo matemático que describe este proceso, posterior se aborda el dinamismo del sistema, definiendo las entidades continuas y discretas que interactúan en el proceso aeropónico, de esta manera y por medio del uso de los formalismos expuestos en el capítulo 3, se plantea y se desarrolla un modelo híbrido jerárquico para la automatización de la frecuencia de dosificación nutricional, mostrando la transparencia y correlación con el modelo aeropónico. Finalmente se valida el modelo jerárquico con el uso de los softwares CPNtools y SUPREMICA, para ello se hace uso de la interpretación del modelo por medio de redes de Petri jerárquicas y autómatas de estado finito.

En el capítulo 5 se realiza la implementación del modelo propuesto, empezando con la presentación de la programación haciendo uso del estándar IEC61131 para controladores lógicos programables. Seguidamente se desarrolla un diseño de experimentos para hallar la frecuencia de dosificación nutricional sobre el cultivo de eruca sativa (rugula) en un sistema aeropónico, que sirva como parámetros base para la aplicación en el modelo desarrollado. Por último, el Capítulo 6 expone las conclusiones y trabajos futuros.

2. Aeroponía

En este capítulo se presentan los conceptos más importantes de sistemas aeropónicos, que se van a considerar para el desarrollo del trabajo. Se realiza una descripción detallada de la técnica aeropónica y las variables abióticas más influyentes en estos procesos sobre cultivos de hortalizas.

2.1 Sistemas aeropónicos

En la actualidad el principal medio para la producción de alimentos sigue siendo el suelo, el cual provee sostén, nutrientes, aire y agua para el crecimiento y desarrollo de las plantas [69], [70]. Sin embargo, el suelo también presenta limitantes como albergue de muchos microorganismos [71] que causan enfermedades en la zona radicular de las plantas. Limitantes químicos que afectan la solubilidad de los nutrientes, toxicidad por nutrientes presentes en el suelo y no requeridos por las plantas como el aluminio, metales pesados entre otros. Igualmente problemas de hipoxias y anoxias por encharcamientos, plagas, enfermedades producto de olas invernales [72], así como competencia entre el cultivo y las malezas, además si no se dispone de riego, la producción se hace dependiente de la oferta ambiental [73], [74].

Por otra parte, la agricultura a campo abierto requiere de grandes extensiones de suelo, con desperdicio de agua, nutrientes y alto uso de pesticidas para el control de plagas y enfermedades. También requiere de una adecuada preparación del terreno, que con el tiempo ocasiona su deterioro y erosión. Toda la problemática anterior, sin tener en cuenta el acelerado crecimiento que la población mundial ha tenido en los últimos 50 años, ha hecho que aumente el consumo de alimentos de forma exponencial, empleando más extensiones de tierra para la producción de alimentos. Todo ello exige el uso y desarrollo de nuevas tecnologías, que se puedan acoplar a sistemas de producción a diferentes

escalas. Uno de esos avances consiste en la optimización del rendimiento de los cultivos, desarrollando nuevas técnicas de producción [75].

En el sistema aeropónico, el desarrollo radicular de las hortalizas es mucho mayor que el crecimiento en su parte aérea, esto hace que el proceso de producción de las plantas en este sistema sea mayor a los demás sistemas sin suelo y/o tradicionales [10]. Siendo el estudio de los factores abióticos lo más relevante en esta técnica, pues necesariamente deben ser controlados para tener una gestión óptima de la nutrición, ya que un control inadecuado de cualquiera de estos factores puede inducir un estrés en el cultivo, viéndose afectado el rendimiento y la calidad de los productos hortícolas [76]. Por esta condición es necesaria una intervención a los factores abióticos más importantes como: la composición de la solución nutritiva y la concentración, el suministro de agua, temperatura y dosificación de la solución de nutrientes, al igual que la concentración de oxígeno disuelto en la zona radicular, evapotranspiración, consumos energéticos del sistema, radiación, humedad relativa, conductividad eléctrica (CE) y el pH de la solución nutritiva.

Existen varias técnicas de producción sin suelo [75]; siendo la hidroponía junto con la aeroponía las dos más utilizadas. La hidroponía usa dos tipos de sistemas, uno con recirculación de la solución nutritiva y otro con medio estático, donde la raíz del cultivo se sumerge por largos períodos de tiempo. La segunda técnica es la aeropónica, a diferencia de la hidroponía, recibe la nutrición por medio de sistemas de microaspersión o nebulización radicular, presentando diferentes medios de crecimiento y soporte de las plantas que van desde medios naturales hasta artificiales. Los medios naturales son materiales de componentes orgánicos como residuos de procesos agroindustriales, cascarilla de arroz, fibra de coco o agroforestales (aserrín), hasta materiales inorgánicos, como arenas o material rocoso particulado, y medios artificiales, materiales que provienen de alguna fibra procesada que permita tener una alta porosidad, por ejemplo la esponja, plástico, icopor, entre otras (ver Figura 2.1).

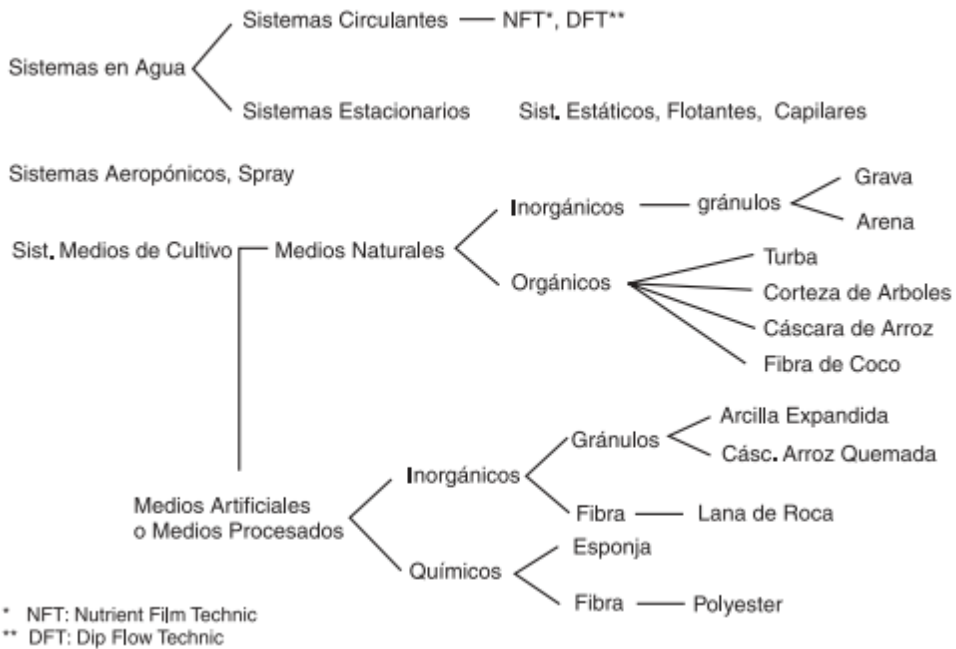


Figura 2.1: Sistemas sin suelo. Tomado de [15]

Los sistemas aeropónicos más comunes, presentan un diseño bajo invernadero en forma de cultivo vertical u horizontal, sometidos a un sistema de presurización dosificada. En la Figura 2.2 se relacionan las patentes más recientes de los dos sistemas.

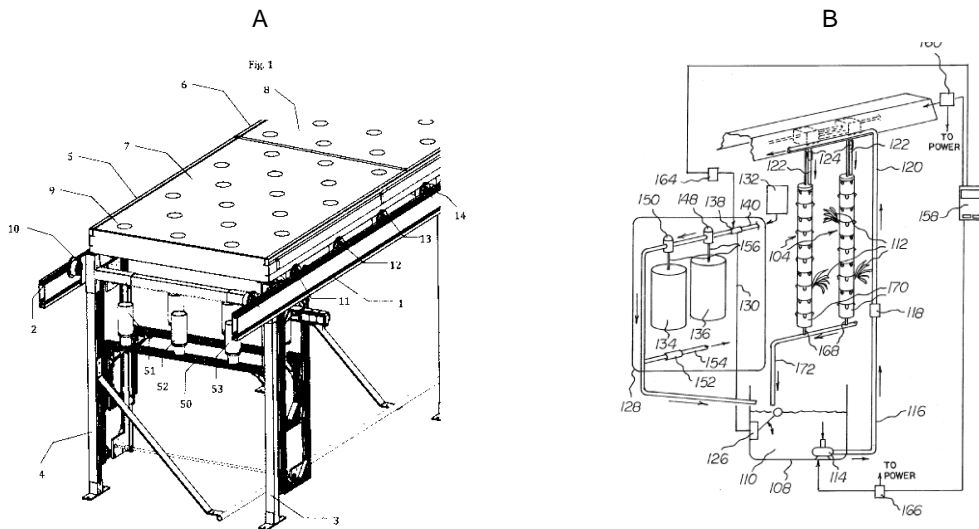


Figura 2.2: Patentes de sistema aeropónico. A) sistema horizontal [77], B) sistema vertical [78].

Sistemas horizontales: son estructuras de aspersión nutricional interna, con gotas menores a 100 micras, generalmente de un ancho no mayor a 1,5 metros, y una altura óptima ergonómica para las labores culturales en horticultura. Su sistema es estático, la zona radicular de las plantas tiende a estar con poca luz, cerrado, pero con ventilación natural, permitiendo una alta disponibilidad de oxígeno en el medio. Ver Figura 2.3.



Figura 2.3: Implementación sistema aeropónico producción horizontal. A) Cultivo de rúgula, B) Camas de sistema aeropónico

Los sistemas verticales: estructuras que pueden ser rígidas o móviles permitiendo el aprovechamiento del espacio vertical, utilizando así un área superficial que incrementa la producción por área. Los sistemas móviles presentan alta versatilidad (Figura 2.4), ya que permiten optimizar el área, sacando la mayor producción posible; este hace rotación sobre su eje, garantizando que todas las plantas tengan la posibilidad de captar energía solar para sus procesos metabólicos. El principio del funcionamiento es igual que los sistemas horizontales.



Figura 2.4: Sistema aeropónico de producción vertical. Citado por [15]

2.2 Solución nutritiva y concentración

La nutrición se compone de la mezcla de fertilizantes agroquímicos y agua, esta es entregada a la zona radicular del cultivo en forma de aspersión. La solución compuesta por iones (aniones y cationes) en disolución [79] debe llevar todo lo necesario para garantizar un óptimo desarrollo y alto rendimiento de la producción. Es indispensable el buen conocimiento de las necesidades nutricionales de las plantas, garantizando el control en la entrega de los elementos minerales para obtener el mayor rendimiento de los cultivos. Un mal manejo de estos elementos puede generar altas concentraciones de nutrientes, incidiendo en la toxicidad en la zona radicular y dando lugar al estrés abiótico del cultivo. Por otro lado el incremento de la frecuencia de la dosificación de nutrición reduce la concentración de minerales en la raíz [80].

La solución nutritiva se compone básicamente de macronutrientes (elementos mayores), requeridos en mayor cantidad para el desarrollo de la planta, y micronutrientes (elementos menores) que se requiere en menor cantidad (ver Tabla 2.1); además de un compuesto llamado "Buffer", utilizado para regular el pH de la solución nutricional.

Tabla 2.1: Elementos necesarios que debe tener la solución nutritiva para el desarrollo de las hortalizas

Macronutrientes		Micronutrientes	
Nombre	Simbolo	Nombre	Simbolo
Carbono	C	Manganeso	Mn
Hidrogeno	H	Hierro	Fe
Oxigeno	O	Zinc	Z
Nitrógeno	N	Cobre	Cu
Fósforo	P	Boro	B
Potasio	K	Molibdeno	Mo
Calcio	Ca	Cloro	Cl
Magnesio	Mg	Sodio	Na
Azufre	S	Niquel	Ni
		Cobalto	Co
		Silice	Si

Respecto a la absorción de los nutrientes por parte las plantas, como se muestra en la Tabla 2.1 se relacionan los nutrientes imprescindibles para el desarrollo vegetal, considerados necesarios para formar una adecuada solución nutritiva. Actualmente se consideran 17 elementos como esenciales para la mayoría de las hortalizas, estos son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, boro, cloro y níquel [81], [82]. Pero cada uno de estos elementos deben estar formado por compuestos asimilables para las plantas. En la naturaleza estos elementos se encuentran combinados con otros, su separación se vuelve costosa e inviable, algunos autores recomiendan para la preparación de la solución nutritiva el uso de compuestos y fertilizantes comerciales, que en su mayoría están formados por nitratos, y sulfatos [83]. (Ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Fertilizantes comerciales para la preparación de soluciones nutritivas. Tomado de [83]

Fertilizante	Fórmula	Riqueza (%)	Peso molecular	Peso equivalente	Efecto sobre la acidez	Solubilidad g L ⁻¹
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	15.5N, 19 Ca	236	118	Básico	1020
Nitrato de potasio	KNO ₃	13 N, 38 K	101	101	Básico	130
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	35 N	80.0	80	Ácido	1180
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	11N, 9 Mg	256.3	128.2	Neutro	420
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	23 P, 28 K	136.1	136.1	Básico	330
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	27 P, 12 N	115.0	115	Acido	230
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	45 K, 18 S	174.3	87.2	Neutro	70
Cloruro de potasio	KCl	52 k, 48 Cl	74.6	74.6	Neutro	35
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ ·7H ₂ O	10 Mg, 13 S	246.3	123.2	Neutro	710
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	20 N, 24 S	132.0	66	Muy ácido	710
Sulfato de manganeso	MnSO ₄ ·H ₂ O	32 Mn	169.0			
Sulfato de zinc	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	23 Zn	287.5			
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10 H ₂ O	11 B	381.2			
Sulfato de cobre	CuSO ₄ ·5 H ₂ O	25 Cu	249.7			
Molibdato amónico	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	58 Mo	1163.3			
Molibdato sódico	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	40 Mo	241.9			
Quelato de hierro	Fe-EDTA	13 Fe	(430)			
Quelato de hierro	Fe-DTPA	9 Fe	(621)			
Quelato de hierro	Fe-DTPA	7 Fe	(799)			
Quelato de hierro	Fe-DTPA	6 Fe	(932)			
Quelato de hierro	Fe-EDDHA	5 Fe	(118)			
Quelato de hierro	Fe-EDDHA	6 Fe	(932)			
Bicarbonato potásico	KHCO ₃	39 K	100.1			
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	54 Ca	74.1		Básico	

Dados los diferentes compuestos comerciales y viables para preparar adecuadamente una solución nutritiva para un cultivo determinado, algunos autores a lo largo de la historia han introducido un gran número de formulaciones y/o recetas, que han sido hasta hoy las más utilizadas y nombradas por su viabilidad y funcionalidad, Hoagland y Arnon [84], Hewitt, Steiner, Cooper, entre otros; donde sus principales variaciones se ven en los fertilizantes, más no en las concentraciones de los elementos que aportan, como se muestra la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Concentración de elementos minerales esenciales. Tomado de [83]

Nutrient	Hoagland & Arnon (1938)	Hewitt (1966)	Cooper (1979)	Steiner (1984)
	mg L ⁻¹			
N	210	168	200-236	168
P	31	41	60	31
K	234	156	300	273
Ca	160	160	170-185	180
Mg	34	36	50	48
S	64	48	68	67
Fe	2.5	2.8	12	2-4
Cu	0.02	0.064	0.1	0.02
Zn	0.05	0.065	0.1	0.11
Mn	0.5	0.54	2.0	0.62
B	0.5	0.54	0.3	0.44
Mo	0.01	0.04	0.2	Not considered

2.3 Dosificación de nutrientes

La dosificación nutritiva o frecuencia de entrega de nutrición al sistema radicular por medio de microaspersión hace parte de uno de los aspectos más relevantes para el sistema aeropónico. Un preciso incremento en la frecuencia de dosificación puede cambiar la concentración de iones en la raíz del cultivo, siendo beneficioso para el desarrollo de las plantas [85]. Sin embargo, un incremento inadecuado, favorecería el aumento de la evaporación, incidiendo en la acumulación de sales minerales en la capa superior del sustrato, propiciando la pérdida de agua y reducción de la disponibilidad de nutrientes en la zona radicular [86].

Se han reportado buenos resultados en diversas plantas con frecuencias de dosificación distintas. En el cultivo de pepino con 7 segundos de riego, y 10 minutos de descanso en un sistema de nebulización [68], para el cultivo de papa 15 minutos de riego y 15 minutos de descanso [87], en el cultivo de tomate con un 1 minuto de riego y 5 de descanso [88], y el cultivo de lechuga 1,5 a 2 min de riego y de 5 a 7 min de descanso [89].

2.4 Suministro de agua

En el sistema aeropónico el control dinámico del suministro del agua es muy necesario para satisfacer las necesidades hídricas de las plantas y evitar acumulación de sales en el sustrato que rodea la raíz. Aunque bajo condiciones de alta transpiración, el suministro de

agua puede ser a menudo insuficiente conduciendo a estrés hídrico temporal en la planta, a fin de evitar esto a veces es pertinente suministrar exceso de este líquido.

El control de los suministros de agua y de nutrientes en un cultivo de hortalizas se ha realizado de acuerdo con las recomendaciones sobre el estado del cultivo en función de la experiencia del agricultor, debido a la capacidad de las plantas en adaptarse a diferentes condiciones ambientales [90]; para manejar este aspecto ambiental se hace necesario el uso e implementación de modelos que regulen el suministro de agua, la absorción, y nutrientes apropiados, en función del cultivo, para mejorar la calidad del producto [90]. En [67] se propone un control de suministro de agua y nutrición a partir de estimaciones de transpiración por el modelo de Penman-Monteith y la concentración de lixiviados, permitiendo el ajuste de ciclos de riego y economía en el uso de los recursos hídricos y fertilizantes en cultivo de tomate.

2.5 Grados día.

Debido a la temperatura ambiente hay una repuesta en el desarrollo fenológico de las plantas [91], por medio de la cual los cultivos presentan desarrollo y crecimiento. La acumulación de grados día (GDD) indica la sumatoria de grados día hasta alcanzar el desarrollo fenológico completo, siendo necesario el cálculo de la temperatura máxima y mínima ambiental diaria, para obtener los grados día [92]. De acuerdo con esto se hace necesario el control de la temperatura ambiente, ya que a temperaturas no óptimas se puede inducir un estrés en el cultivo, viéndose reflejado en un bajo rendimiento y producción de la planta; además es un factor muy importante para determinar el momento para realizar la cosecha [26].

2.6 PH y Conductividad

El pH óptimo de la solución para la mayoría de las plantas en cultivos sin suelo tiene un rango de 5,5 a 6,5 [75] ver Tabla 2.4, sin embargo para valores entre 5.0-5.5; 6.5-7.0 no causan daño para la mayoría de los cultivos, aunque garantizando valores entre el rango óptimo de pH se asegura el adecuado crecimiento y desarrollo en las plantas, representando un menor riesgo si se tiene un pH en la solución por debajo o encima de lo especificado [67].

Tabla 2.4: pH óptimo para algunos vegetales. A) Rangos de pH óptimos; B) Escala de acidez de pH. Citado por [18]

A

Fruit Plants	Optimum pH Range
Apple	5.5-6.5
Blueberry	4.5-5.5
Cherry	6.5-8.0
Pear	6.5-7.5
Plum	6.5-8.5
Black Raspberry	5.5-7.0
Red Raspberry	6.0-7.5
Strawberry	5.5-6.5
Grapes	5.5-7.0
Vegetables	
Asparagus	6.0-8.0
Beans	6.0-7.0
Beets	6.5-8.0
Broccoli	6.0-7.0
Cabbage	6.0-7.5
Cantaloupe	6.0-7.5
Carrots	5.5-7.0
Corn	5.5-7.5
Cucumbers	5.5-7.0
Eggplant	5.5-6.5
Lettuce	6.0-7.0
Onions	6.0-7.0
Peas	6.0-7.5
Peppers	5.5-7.0
Potatoes	4.8-6.5
Sweet Potatoes	5.2-6.0
Radishes	6.0-7.0
Rhubarb	5.5-7.0
Spinach	6.0-7.5
Squash	6.0-7.0
Tomatoes	5.5-7.5

B

too acid for most plants

most desirable range for plants (5.4 - 6.4)

too alkaline for most plants

1.0 limes
2.0 1.8 - 2.0
3.0 grapefruit (3.0 - 3.3)
4.0
5.0
6.0
7.0 drinking water (6.5 - 8.0)
8.0
9.0
10.0
11.0 ammonia (10.6 - 11.6)
12.0
13.0
14.0 strong lye (14.0)

La conductividad eléctrica (CE) es modificada en sistemas sin suelo por las plantas a medida que absorben nutrientes y agua desde la solución nutritiva. Por lo tanto, una disminución en la concentración de algunos iones, es el aumento en la concentración de los demás [75].

La mayoría de los autores llegan a un consenso de conductividad óptima para las hortalizas en sistemas sin suelo, esta figura entre el rango de 1500 a 2500 mS cm⁻¹. En general valores mayores de 2500 mS cm⁻¹ puede inducir a problemas de salinidad y valores inferiores de 1500 mS cm⁻¹ podrían ocasionar deficiencias nutricionales. Por lo tanto, se aconseja utilizar un CE alta en algunos cultivos, para mejorar la calidad del producto y mantener un control sobre la CE de la solución para optimizar el crecimiento de las plantas y sus frutos [18]. Por ello la implementación de control CE, temperatura de las soluciones, junto con sensores de pH, son esenciales para garantizar la máxima nutrición y crecimiento de las plantas [18].

2.7 Crecimiento y desarrollo de las plantas

El crecimiento y desarrollo de las plantas se puede evidenciar por la acumulación de biomasa, y la acumulación de grados día. La acumulación de la temperatura ambiente indica el tiempo fisiológico de las plantas, determinando así su estado y etapa de desarrollo y crecimiento.

Las plantas presentan varios estados de desarrollo que se pueden agrupar en tres fases esenciales para todo cultivo [93], las cuales son necesarias para determinar cuándo un cultivo es apto para su cosecha y comercialización, enumeradas a continuación.

1. Fase Long: Está representada por una tasa de crecimiento baja.
2. Fase exponencial: Tasa de crecimiento rápida, donde se obtiene el máximo crecimiento de la planta.
3. Fase estacional o transicional: Etapa donde el crecimiento se torna constante en el tiempo.

3.Herramientas y formalismo de sistemas híbridos

El objeto de este trabajo es el desarrollo de un modelo que represente adecuadamente la frecuencia de dosificación nutricional en un sistema aeropónico, planteando como hipótesis que el modelo para la frecuencia de dosificación nutricional durante el crecimiento y desarrollo de las plantas se puede representar por un autómata híbrido jerárquico. Siendo los autómatas un caso particular de las redes de Petri que considera diferentes niveles de abstracción superior, generando una vinculación directa de las variables más influyentes del proceso, y admitiendo un desarrollo importante para la agricultura urbana.

En este capítulo se muestra la selección de los formalismos y herramientas para sistemas híbridos que se trabajarán en el desarrollo del modelo propuesto para la automatización de la dosificación nutricional en un sistema aeropónico. Iniciando con la definición de sistemas a eventos discretos; una herramienta ideal para el modelamiento de un proceso enfatizado en el uso de formalismos definidos por las redes de Petri; estos sistemas permiten validar el modelo propuesto brindándole una mayor robustez. Seguido se presenta la relación entre redes de Petri y autómatas, cuyo paso se alcanza generando el espacio de estados de la red de Petri (árbol de alcanzabilidad), para llegar al autómata, de forma contraria se da directamente, generando una correlación estrecha que proporciona el uso conjuntamente de estos formalismos. Finalmente, se aborda el formalismo de autómata híbrido jerárquico que presenta una alta capacidad para expresar la presencia de las dinámicas continuas y discretas, el cual sustentará el desarrollo de la propuesta de tesis.

3.1 Sistema a eventos discretos (DES)

Los sistemas dinámicos a eventos discretos (DES, por sus siglas en inglés), son modelos de estado discreto (variables que cambian sólo en un número finito de puntos en el tiempo [94]), conducido por eventos, donde la evolución del sistema en el tiempo depende de la ocurrencia asincrónica de eventos discretos [95]. Como se expresa en [94], esta evolución del sistema en el tiempo “Traduce en cambios de estado de algún atributo de una entidad, a través de un evento que ocurre en cierto instante”.

Los DES en la automatización tiene alta aplicabilidad en procesos con actividades concurrentes o secuenciales, dado su facilidad para la representación de sistemas complejos, diseño y especificaciones entendibles que facilitan la transición entre el diseño y la implementación, y a su vez las técnicas que ofrecen para la programación que hace posible la reusabilidad del software [94]. Según [96] estos sistemas se pueden aplicar en diferentes sectores como lo son: el sector industrial, eléctrico, el sector de las comunicaciones, y las redes de transporte.

3.2 Redes de Petri (PN) y Autómatas de estado finito (FSA)

Las redes de Petri y los FSA hacen la representación de modelos generales de un sistema a eventos discretos demostrando que pueden ser muy útiles para modelar la complejidad, permitiendo expresar de manera práctica los modelos de estados y eventos de forma gráfica; además de la facilidad para hacer un análisis detallado por medio de la teoría de lenguajes y operaciones en procesos concurrentes.

Como se mencionó en el capítulo 2 los sistemas de eventos discretos cuentan con una amplia gama de herramientas para el control de sistemas, las cuales fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis, ya que permiten trabajar con sistemas jerárquicos, como los son las redes de Petri jerárquicas y los autómatas finitos. A continuación, encontrarán las definiciones de redes de Petri ordinaria y autómatas finitos, lo que permitirá entender un poco más sobre la importancia y uso de estos sistemas, para luego entrar en los formalismos que proporcionan las herramientas necesarias para trabajar con sistemas jerárquicos.

3.3 Redes de Petri (PN)

Las redes de Petri son un modelo de sistemas de eventos discretos [97], compuesto por conjuntos finitos de lugares y transiciones que presenta un formalismo tanto matemático como gráfico [59], que permite describir relaciones entre condiciones y eventos presentes en un sistema, donde su dinámica se ve representada por la evolución del marcaje [95]. Como se muestra a continuación en su definición formal.

Definición 3.1 (Red de Petri ordinaria)

Una red de Petri ordinaria es una 3-tupla $N = \langle P, T, F \rangle$, [94], [95], [59], [97]–[99] donde:

n - tupla, composición de conjunto finito no vacío de n elementos $\langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$, para n un número entero positivo.

$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$, siendo P un conjunto finito no vacío de m lugares, en su representación gráfica se muestra como un círculo [100].

$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$, siendo T un conjunto finito no vacío de n transiciones, en su representación gráfica se muestra como un rectángulo o línea [100].

F , es un conjunto de arcos dirigidos que van de un lugar a una transición ($P \rightarrow T$) y de una transición a un Lugar ($T \rightarrow P$), tal que $F \subseteq (PxT) \cup (TxP)$. Expresando formalmente a F como:

$$F = \{A_{m \times n}, B_{m \times n}\}$$

Siendo,

$A_{m \times n}$: Matriz de incidencia previa, que representa un arco dirigido de un lugar p_i a una transición t_j ($p_i \rightarrow t_j$).

$B_{m \times n}$: Matriz de incidencia posterior, que representa un arco dirigido de una transición t_i a un lugar p_i ($t_j \rightarrow p_i$).

Definición 3.2 (conjunto entrada / Salida)

Definidos como los conjuntos que ingresan y salen de una transición, al igual que a un lugar. Estos representan los componentes de las matrices de incidencia previa y posterior que reflejan el valor de los pesos de los arcos dirigidos, entre transiciones y lugares.

Lugares de entrada a la transición t :

$$\bullet t = \{p \in P: (p, t) \in F\}$$

Lugares de salida de la transición t :

$$t \bullet = \{p \in P: (t, p) \in F\},$$

Transiciones de entrada a lugar p :

$$\bullet p = \{t \in T: (t, p) \in F\}$$

Transiciones de salida de lugar p :

$$p \bullet = \{t \in T: (p, t) \in F\},$$

Una red de Petri puede cambiar, si hay una distribución entre los marcajes de cada lugar. Esta distribución se genera por el cambio dinámico de la red, el cual se ve reflejado por los disparos (activación) de las transiciones, generando la evolución de la red y cambio de los marcajes de cada lugar [100]. Para que una red tenga una evolución, esta debe tener unas condiciones iniciales que estarán definidas por un marcaje inicial, permitiendo el avance de un lugar a otro. A continuación, se presenta el formalismo que define una red con marcaje inicial y las condiciones que permiten su evolución dinámica.

Definición 3.3 (Red de Petri marcada)

Una estructura N (red de Petri ordinaria) con un marcaje inicial denominado M_0 , a la cual se le denota como $\langle N, M_0 \rangle$, llamándose red de Petri marcada, esto permite representar el comportamiento dinámico de una red [94], [100].

$$RM = \langle N, M_0 \rangle$$

Donde:

M_0 es un vector compuesto por los marcajes de todos los lugares de la red. Gráficamente una red de Petri marcada, está representada por el número de puntos en los lugares, denotada por $M_0(p)$.

$[M(p_1) M(p_2) M(p_3) \dots M(p_m)]^T$, con $p_1, p_2, p_3, \dots, p_m$, siendo los m lugares de la red de Petri.

Definición 3.4 (Transición sensibilizada)

Una transición $t \in T$ esta sensibilizada en un marcaje M si: La evolución de la red dependerá del marcaje inicial y el peso del arco relacionado con la transición t , donde este peso deberá ser menor e igual a la cantidad de marcas que haya en el lugar previo[94], así:

$$\forall p \in \bullet t : M(p) \geq 1$$

Definición 3.5 (Red de Petri Interpretada)

Una red de Petri interpretada es una red de Petri marcada con la adición de algunas modificaciones que permiten habilitar condiciones a las transiciones cuando se cumpla un evento [51].

Según [94] una red de Petri interpretada (IPN) es un 3-tupla $\langle N, \ell, M_0 \rangle$ donde:

$\langle N, M_0 \rangle$, es una red marcada

$\ell: T \rightarrow \{2^{\Sigma} \cup \varepsilon\}$, etiqueta que asigna a cada transición un evento, que condiciona la evolución de la red por medio de la transición.

F , es un conjunto de arcos dirigidos, tal que $F \subseteq (PxT) \cup (TxP)$. Siendo la unión de la matriz de incidencia previa, con la posterior.

Definición 3.6 (Árbol de alcanzabilidad)

El árbol de alcanzabilidad o espacios de estado es un grafo dirigido cuyos nodos son marcajes alcanzables por $R\langle N, M_0 \rangle$ y las transiciones están rotuladas con las etiquetas $\ell(t)$. Este grafo es:

$\forall M, M' \in R\langle N, M_0 \rangle$, entonces existe un arco etiquetado de M a M' por $\ell(t)$ si $M \xrightarrow{t} M'$

El árbol de alcanzabilidad para una red, se puede definir como todos los marcajes de las posibles secuencias de disparo de las transiciones en una PN, para que sea efectiva su evolución, dando como resultado un árbol con la representación de las marcas generadas a partir de marcación M_0 , en forma de nodos unidos por arcos que definen la activación (disparo) de una transición y permite transformar una marca en otra [101], además la generación del árbol permite la validación de la mayoría de las propiedades estáticas y dinámicas que establece la teoría de PN.

3.3.1 Propiedades

Las propiedades dinámicas de las redes de Petri son de dos tipos: propiedades funcionales y propiedades estructurales. Las funcionales son las que dependen del marcaje inicial, y las estructurales son independientes de la marca inicial, siendo dependientes de su tipología [101].

En las propiedades estructurales se tienen como la red ordinaria y pura, y en las funcionales como viva, segura, conforme, cíclica y limitada.

En las siguientes definiciones se presentan algunas de las propiedades dinámicas que se emplearán para la validación del modelo de PN propuesto, que cumple con las características asociadas al proceso.

Definición 3.7 (Red limitada)

La limitación en una red de Petri, se puede definir como la no acumulación de marcas infinitas en ningún lugar de la PN, así:

Una red de Petri marcada $\langle N, M_0 \rangle$ es limitada si existe un entero k tal que:

$\forall M \in R\langle N, M_0 \rangle, \forall p \in P: M(p) \leq k$, siendo R una red de Petri.

Definición 3.8 (Red segura)

Una PN es segura, si todos los lugares de la red son seguros, es decir que su número de marcas para cada lugar sea menor e igual que uno, así:

Una red de Petri marcada $\langle N, M_0 \rangle$ es segura si es acotada y $k = 1$, así:

$$\forall M \in R(N, M_0), \forall p \in P: M(p) \leq 1$$

Definición 3.9 (Red viva)

Definida como red viva cuando todos los marcajes son alcanzables desde el marcaje inicial, de esta manera si una red es viva se puede decir que es libre de bloqueos.

Una red de Petri marcada $\langle N, M_0 \rangle$, es viva si todas sus transiciones son vivas, una transición t es viva si cumple lo siguiente:

$\forall M \in R(N, M_0) \exists M' \in R(N, M)$, donde:

M' , denotación de la evolución de un marcaje M cuando hay una transición sensibilizada en este marcaje.

3.4 Autómata de estado finito como red de Petri

Los autómatas finitos pueden ser representados en una red de Petri, que genera y marca los mismos lenguajes [95]. Siendo importante esta transformación ya que las redes de Petri, tienen más estructura en su representación de la función de transición y por tanto representa más lenguajes que los autómatas de estados finitos.

Definición 3.10 (Autómata como red de Petri)

Según [59] un autómata finito es una red de Petri ordinaria (los pesos arcos son iguales a 1) donde cada transición t tiene exactamente un lugar de entrada y uno de salida.

$$\forall t \in T \mid \bullet t \mid = 1 \text{ y } \mid t \bullet \mid = 1$$

El paso de autómata a red de Petri, se realiza de forma directa o inmediata, mientras que en caso contrario se debe generar el espacio de estados de la red de Petri, (Árbol de alcanzabilidad), a partir de este se obtiene un autómata determinístico, los lenguajes generados y marcados [94], como se observa en la Figura 3.1.

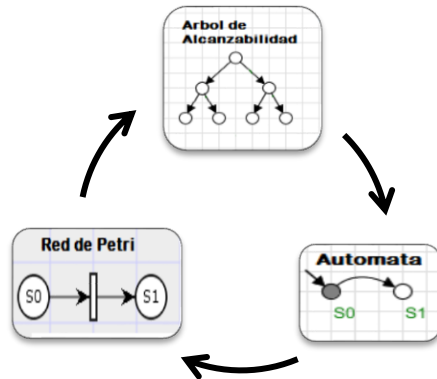


Figura 3.1: Estructura de relación entre autómatas y redes de Petri. Fuente [94]

3.4.1 Teoría de lenguajes y autómatas

Las reglas gramaticales presentes en los lenguajes matemáticos y de programación para autómatas, cuentan con estructuras semánticas y sintácticas que permiten realizar operaciones sobre conjuntos [102].

En esta sección se definirán los conceptos más importantes empleados en la teoría de autómatas, tales como alfabeto, cadenas, lenguaje y sus operaciones.

Alfabeto

Un alfabeto es un conjunto finito de símbolos no vacío, donde sus elementos son representados por letras minúsculas y los alfabetos con letras Mayúsculas.

Cadena

Una cadena es una secuencia finita de símbolos de algún alfabeto, pudiéndose llamar “Palabra”.

Lenguaje

Sea Σ conjunto de eventos finitos, no vacíos, denominado alfabeto, donde una secuencia de Σ es una cadena de caracteres o palabra formada sobre el alfabeto Σ . Se denota como Σ^+ todas las cadenas no vacías posibles sobre el alfabeto Σ , y Σ^* como todas las cadenas posibles sobre el alfabeto Σ [102], [103] (incluye elemento vacío) así:

$$\Sigma = (\alpha, \beta, \gamma, \dots)$$

$$\Sigma^+ = (\Sigma^1, \Sigma^2, \Sigma^3 \dots)$$

$$\Sigma^* = \Sigma^+ \cup (\varepsilon)$$

Donde:

(ε) es una cadena vacía definida como Σ^0

Σ : alfabeto, con α, β, γ , como elementos o letras del alfabeto Σ

Σ^+ : cadenas no vacías compuestas por alfabetos

Entonces un lenguaje L , definido sobre conjunto de símbolos de Σ , es el conjunto de todas las cadenas o palabras finitas formadas a partir de un alfabeto Σ .

Operaciones con lenguajes

El lenguaje acepta las operaciones básicas sobre conjuntos, además también las que se definirán a continuación:

Definición 3.11 (Concatenación)

Sean l_x y l_y , dos lenguajes tal que $l_x \wedge l_y \in \Sigma^*$, la concatenación s , es la concatenación entre las palabras de cada uno de los lenguajes así:

$$l_x l_y := \{s \in \Sigma^* : (s = s_x s_y) \wedge (s_x \in l_x) \wedge (s_y \in l_y)\}$$

Definición 3.12 (cerramiento de prefijos)

Sea L es un lenguaje tal que $L \in \Sigma^*$, el prefijo cerrado de L se define como

$\bar{L} := \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*)[st \in L]\} \forall L \subseteq \bar{L}$, tal caso $L = \bar{L}$, entonces L es prefijo cerrado.

Definición 3.13 (Cerramiento de Kleene)

Sea L es un lenguaje tal que $L \in \Sigma^*$, el cerramiento de Kleene de L se define como

$$L^* := \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \cup \dots$$

3.5 Autómata finito

Los autómatas de estado finito se caracterizan por tener un estado inicial y otro final, opera sobre un conjunto finito de símbolos de entrada (alfabeto) y posee un número finito de estados, produciendo símbolos de salida desde el alfabeto finito.

Definición 3.14: Autómata de estados finitos (FSA)

$G = (S, \Sigma, f, \Gamma, s_0, S_m)$ [94], [95], Donde:

S , es el conjunto de estados

Σ , alfabeto y conjunto finito de eventos asociados a S

$f : S * \Sigma \rightarrow S$, es una función de transición definida para Σ en todo estado

$\Gamma : S \rightarrow 2^\Sigma$, es una función de eventos activos

$\Gamma(s)$: Conjunto de todos los eventos donde $f(s, \sigma)$ está definida y se denomina conjunto de eventos activos de G en s

s_0 , es el estado inicial

$S_m \subseteq S$, es el subconjunto de S que representa los estados marcados.

3.5.1 Lenguaje generado por autómatas

“El lenguaje generado por autómata se denota $L(G)$, definiéndose como el conjunto de todas las cadenas posibles que se pueden dar en el autómata. El lenguaje marcado $L_m(G)$, son todas las cadenas posibles que llevan a estados finales, comenzando desde el estado inicial.” [94] por lo tanto:

$$L_m(G) \subseteq L(G)$$

Definición 3.15 (Lenguaje Generado y marcado)

Dado $G = (S, \Sigma, f, \Gamma, S_0, S_m)$, un Autómata. El lenguaje generado por G se define como:

$$L(G) = \{ \sigma \in \Sigma^* \mid \exists (s, \sigma)!, \text{ para algun } s \in S \}$$

El lenguaje marcado por G es:

$$L_m(G) = \{ \sigma \in \Sigma^* \mid \exists (s, \sigma) \in S_m, \text{ para algun } s \in S \}$$

3.5.2 Propiedades

Definición 3.16 (Alcanzabilidad)

Un estado s es alcanzable en un autómata si $\exists \sigma \in \Sigma^*: f(s, \sigma)!$, donde s_0 es el estado inicial del autómata.

Definición 3.17 (Bloqueo)

Un autómata G se define como no bloqueante si cumple lo siguiente

$$\overline{L_m(G)} \subset L(G)$$

Y no es bloqueante si

$$\overline{L_m(G)} = L(G)$$

3.6 HHA: Autómata híbrido jerárquico

Definidos los formalismos de redes y autómatas, se entrará en la definición de autómata híbrido jerárquico, presentándose como una extensión del formalismo de autómata híbrido [104],[37], que son máquinas para describir, y especificar los sistemas de eventos discretos, su semántica hace accesible la validación formal, permitiendo que los comportamientos dinámicos de sistemas más complejos con cierto grado de abstracción se puedan analizar [55].

Los autómatas híbridos jerárquicos (HHA, por sus siglas en inglés), son modelos matemáticos [56] que permiten dar un diseño formal para una descripción clara del comportamiento de sistemas con jerarquía [54]. Además de facilitar la desagregación de los estados jerárquicos en modelos de autómatas finitos para probar, analizar y validar las propiedades de los sistemas que se describen [105]. A continuación se introducirá el concepto formal de HHA presentado por [54], [55], [57].

HHA es una 5-tupla $\langle X, S, S_0, \beta, \alpha, \text{init}, \text{Inv}, \text{Flujo}, E, F, \text{Event} \rangle$. Donde:

- $X \subseteq \mathbf{R}^n \times \{X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n\}$ Conjunto finito de variables continuas
- $S =$ Conjunto finito de estados que se dividen en tres conjuntos disyuntos $S_{\text{simple}}, S_{\text{compuesto}},$ y $S_{\text{concurrente}},$ que contienen una posición de inicio designada

$S_0 \in S_{comp} \cup S_{conc}$, conjuntos que definen los estados de jerarquía.

- $S_0 \in S \setminus S_{simple}$, definido como el conjunto de estado inicial.
- $\alpha(S)$ y $\beta(S)$ son estados jerárquicos donde para cada $s \in S$ existe $\alpha(S)$, subestado activo asociado que se define de la siguiente manera. A continuación, se introducirán el concepto de jerarquía.

$$\alpha(S) = \begin{cases} 0, & \forall s \in S_{simple} \\ S^*, \in \{S_{simple} \cup S_{comp}\} & \forall s \in S_{comp} \\ S_i, \in S \setminus \{S_0\} \ i \geq 2 & \forall s \in S_{conc} \end{cases}$$

Además, para cada $s \in S \setminus \{S_0\}$, existe un solo estado superior $\beta(S)$, por tanto, debe contener una función de jerarquización $\beta(S) \in S_{comp} \cup S_{conc}$.

- $Inv: S_{simple} \rightarrow \rho(x)$ función que asigna una restricción lineal $Inv(S)$ a cada estado $s \in S_{simple}$
- $Init$: función etiquetada como $init(S_i)$ que asigna una condición inicial a cada estado $S_i \in S$
- $Flow: S_{simple} \rightarrow h(X \cup X')$ Función que asigna un flujo de restricciones dinámicas $Flow(S)$ a cada estado de control $s \in S_{simple}$
- $E \subseteq S \setminus \{S_0\} * S \setminus \{S_0\}$ Conjunto finito de transiciones entre estados, se denota como $e = \{S_1, S_2\} \forall e \in E$, donde S_1 y $S_2 \in S \setminus S_0$
- $F : E \rightarrow \rho(x)$ función que asigna a cada transición $e \in E$ una restricción $F(e)$
- $Event: \Sigma$ función que asigna un evento $Event(e)$ a cada transición $e \in E$

La utilización de este formalismo para el desarrollo de la propuesta de tesis se presenta en el capítulo 4, con el acompañamiento de autómatas finitos y redes de Petri, para la representación gráfica y su validación formal.

4.Propuesta de modelamiento aeropónico

El eje central del trabajo de investigación radica en la aplicación de la teoría de sistemas a eventos discretos, con la intervención de autómatas y redes de Petri para la representación de la frecuencia de dosificación nutricional de las hortalizas, a lo largo de la vida fenológica de un cultivo en medios aeropónicos.

Este Capítulo presenta inicialmente una propuesta de desarrollo del modelo aeropónico con sus variables más influyentes para una etapa, que puede ser replicado en las demás, diferenciadas por la acumulación de grados día, y la frecuencia de dosificación nutricional, para tener como consolidado un modelo matemático que describa el proceso. Posterior se define el dinamismo del sistema, con la identificación y caracterización de las entidades continuas y discretas, para entrar a presentar la propuesta de modelado bajo el formalismo seleccionado en el Capítulo 3 de autómata híbrido jerárquico y redes de Petri, finalmente se hace el análisis y validación del modelo propuesto por medio de las herramientas Supremica y CPN tools.

4.1 Modelo propuesto

Se ha evidenciado que el desarrollo de las plantas en un medio aeropónico es más acelerado que en medios tradicionales, donde el factor influyente ha sido la disponibilidad continua de la nutrición en la zona radicular. Algunas investigaciones han logrado determinar períodos de permanencia de la nutrición en la zona radicular, logrando muy buenos resultados tanto en el sistema aeropónico como en medios tradicionales.

Existen algunas interacciones entre el sistema-planta-ambiente, donde la nutrición y dosificación juegan un papel muy importante en el desarrollo de las plantas, tanto para su crecimiento radicular como foliar. La aeroponía es una técnica que permite el control de muchos factores abióticos adecuados para la representación plena y óptima del desarrollo,

eliminando los factores bióticos producto del suelo, sobresaliendo los factores abióticos ya mencionados, control que favorece un resultado óptimo del modelo del sistema.

El modelo propuesto para la frecuencia de dosificación nutricional en función de las variables principales del sistema, está basado en el desarrollo y crecimiento de las plantas de acuerdo a la acumulación de grados día, permitiendo representar la variabilidad existente de la dosificación nutricional entre el estado de desarrollo de las plantas y las condiciones físicas de cambio día a noche y viceversa. Como se puede apreciar en la Figura 4.1 la frecuencia de dosificación nutricional de hortalizas en ambientes cerrados y mínimamente controlados (invernadero), depende principalmente de los factores climáticos como la radiación solar, concentración de CO₂ y los procesos fisiológicos como fotosíntesis, transpiración y desarrollo vegetal, además de acuerdo al estado de desarrollo y crecimiento de la planta, se debe contar con una nutrición y frecuencia de dosificación nutricional determinada.

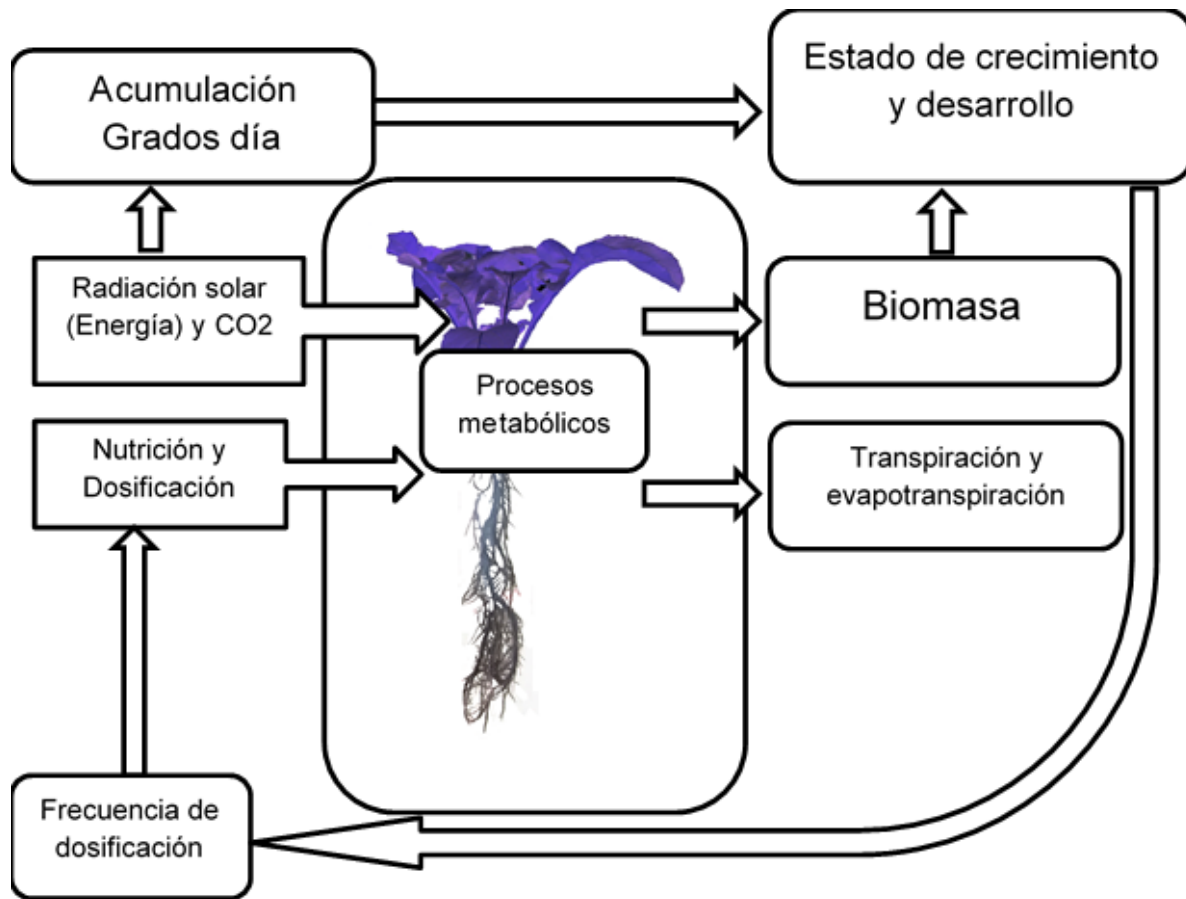


Figura 4.1: Proceso de dosificación nutricional en medio aeropónico (fuente propia)

4.1.1 Proceso de dosificación nutricional.

La nutrición en un sistema aeropónico, se entrega en la zona radicular de las plantas por medio de un sistema de riego. En frecuencias de riego en el tiempo, estas dependen de la etapa fenológica del cultivo y la radiación incidente sobre el mismo (día o la noche).

La solución nutritiva deberá tener unas condiciones necesarias para la buena asimilación de los nutrientes por parte de las plantas, estas condiciones están ancladas a variables abióticas, como lo es la conductividad, el pH y temperatura de la solución; además de garantizar una presión de salida mayor a 50 psi que permita entregar un tamaño de gota entre las 50 y 150 micras para el buen desarrollo radicular de las plantas.

La frecuencia de dosificación está relacionada con el crecimiento y desarrollo de las plantas, estas a su vez dependen de forma general de las condiciones climáticas (temperatura y humedad), plagas, enfermedades y solución nutritiva. Este proceso de dosificación puede generar un gran cambio en el desarrollo de las plantas si se garantiza una frecuencia nutricional que cambie en el tiempo, dependiendo de las condiciones climáticas y el estado de desarrollo. A esto le apunta la representación gráfica de la Figura 4.1 que presenta un sistema en función de la frecuencia de dosificación nutricional.

4.1.2 Modelación del sistema aeropónico

La propuesta de dosificación nutricional plantea los parámetros más importantes en sistemas aeropónicos que lo modelan en función de la frecuencia de dosificación nutricional.

Solución nutritiva

La solución nutritiva para las plantas varía en función de la etapa de desarrollo en que se encuentre, donde la variación de los componentes de la solución radica básicamente en los elementos mayores que se deben ir ajustando en cada etapa, las demás variables de la solución se deben ajustar a un rango específico donde las plantas presentan mejor absorción de los diferentes elementos:

- pH: Entre 5,5 – 6,5
- CE: Etapa 1, 1500 - 2000 microsiemens
- CE: Etapa 2, 1800 - 2500 microsiemens
- CE: Etapa 3, 2500 - 3000 microsiemens
- Temperatura de la solución: Entre 20 - 30 °C

- Presión de salida: 45 - 60 psi

Temperatura

La temperatura marca el índice indirecto del crecimiento y desarrollo de una planta por medio de la estimación de los grados días (GD), pudiéndose determinar el tiempo de los procesos biológicos de las plantas. Cuando hay un cambio físico en las plantas, ya sea por formación foliar o radicular este se ve reflejado en los GD, de esta manera los grados día pueden ser un factor muy importante a la hora de predecir el cambio de los estados fenológicos en una planta.

Para el cálculo de los grados día acumulados se tiene el método de umbrales de temperatura o técnica de curva sinusoidal, usando el método de seno simple [92], empleando la temperatura mínima y máxima durante un día de 24 horas. Este método usa las temperaturas Umbrales tanto superior como inferior para el cálculo, donde los grados día se calculan como el área bajo la curva entre los umbrales de temperatura, tal como se aprecia en la ecuación.

$$GDD = \sum_{i=1}^n GD_i \quad (4.1)$$

Dónde:

- GD_i : Grados día del día i
- n : número de días

Frecuencia de dosificación

La frecuencia de dosificación está dada tanto por la etapa fenológica del cultivo como por el cambio de día con respecto a la noche. A medida que las plantas van creciendo requieren de mayor nutrición y los procesos metabólicos tienden a tener variaciones tanto en el día como en la noche, por tanto, su requerimiento nutricional estará condicionado por ese cambio. Es decir que un cultivo bajo este sistema puede presentar unas condiciones de frecuencia de dosificación distintas tanto para el día y la noche, como para cada una de sus etapas fenológicas. Estos cambios se definen asociando una frecuencia de dosificación para el día de la i -ésima etapa (FRiD) y otra para la noche de la i -ésima etapa (FRin), además cada etapa tendrá un tiempo donde el sistema de dosificación estará encendido, definido como tiempo de riego de la i -ésima etapa (TRi), y tiempo de apagado,

definido como tiempo de descanso de la i -ésima etapa (TD_i), como se presenta a continuación.

1. FR_{id} : Frecuencia de riego diurna de la i -ésima etapa
 - TR_{id} : Tiempo de riego diurno de la i -ésima etapa
 - TD_{id} : Tiempo de descanso de riego diurno de la i -ésima etapa
2. FR_{in} : Frecuencia de riego Nocturna de la i -ésima etapa
 - TR_{in} : Tiempo de riego nocturno de la i -ésima etapa
 - TD_{in} : Tiempo de descanso de riego nocturno de la i -ésima etapa

El cambio de la frecuencia de riego varía tanto para las etapas de crecimiento y desarrollo como para el cambio de día y noche, funciona de forma conmutable (ciclo). En las plantas está directamente relacionada con los requerimientos nutricionales, ya sea por las condiciones climáticas o tipo de cultivo. Dado lo anterior se presenta la Figura 4.2, que tiene como propósito mostrar el ciclo de la frecuencia de dosificación nutricional, ya sea para el día o la noche de una etapa, definida por la asignación de un tiempo t , tanto para la duración del riego (t_{ai}) como para la duración de apagado del riego (t_{bi}), que va cambiando en el tiempo.

Sea

$$FR = t_{ai} + t_{bi}, \forall t \in R \quad (4.2)$$

donde

FR : Frecuencia de riego de la i -ésima etapa

t_{ai} : tiempo de riego de para la i -ésima etapa

t_{bi} : tiempo de descanso para la i -ésima etapa

La frecuencia de riego determina el tiempo total en realizarse el ciclo de la dosificación nutricional en medio aeropónico, de esta manera este concepto puede ser usado tanto para la dosificación diurna como nocturna a lo largo de las etapas fenológicas.

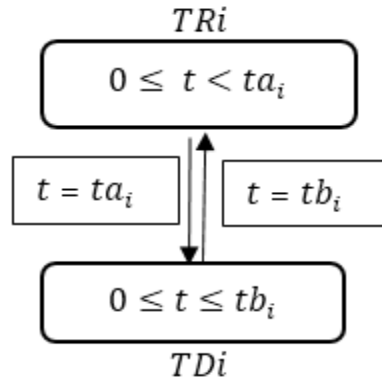


Figura 4.2: Ciclo de riego para la i -ésima etapa

En cuanto al cambio de estado de Día-Noche o Noche-Día, se puede representar por medio de una función ($F(d)$), que determine el cambio Día-Noche y Noche-Día en función al tiempo universal coordinado GMT/UTC como se muestra en la Figura 4.3. A nivel de la planta se refleja la variación en cuanto a la transpiración, y fotosíntesis; junto con el cambio de la dosificación nutricional en relación a la variación de las demandas nutricionales que una planta pueda tener tanto en el día como en la noche.

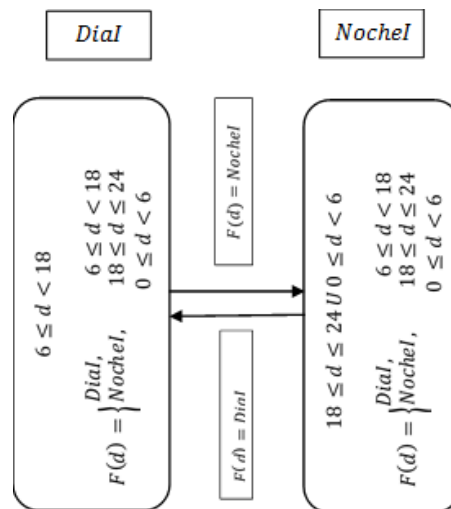


Figura 4.3: Cambio Día-Noche, Noche-Día

Ahora bien, (4.1) muestra el calculado de GDD como la suma de grados de cada día en un período de tiempo para un cultivo, estableciendo como necesaria la temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y temperatura base o mínima requerida por el cultivo para su crecimiento. Con el uso de esta ecuación se puede representar para cada

cultivo la transición de una etapa a otra, determinando los grados días necesarios para cada fase como se presenta en la Figura 4.4. Cada una de las etapas está determinada por el tiempo fisiológico expresado en grados días, esto significa que la transición entre una etapa y otra está dada por la acumulación de unidades de calor de las etapas anteriores, dado que el tiempo fisiológico de las plantas está determinado por la cantidad de energía necesaria para llegar a un estado fenológico, pudiéndose representar como la suma de grados días necesarios para alcanzar un estado de madurez. Físicamente la acumulación de grados día se ve reflejada en la producción de biomasa vegetal (ver Figura 4.1), la cual es determinada por la medición de variables alométricas para la planta, por ejemplo, longitud y número de hojas, área foliar, longitud vertical, entre otras.

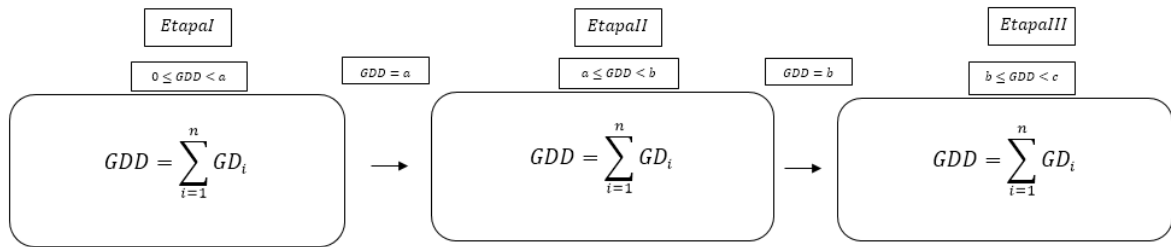


Figura 4.4: Etapas fenológicas expresadas por el cambio de *GDD*

Finalmente, en la Figura 4.5 se presenta el modelo propuesto para la frecuencia nutricional en hortalizas bajo sistemas Aeropónicos en función de la fenología de las plantas. Modelo que integra esas tres etapas de crecimiento y desarrollo, vinculando los procesos más representativos para cualquier hortaliza en este medio. La evolución del modelo únicamente se verá reflejada por la acumulación de grados días, pero teniendo presente los diferentes cambios de iluminación como lo es el día y la noche, ya que la mayoría de las plantas reducen su actividad metabólica en la noche.

A pesar que el modelo propuesto se realizó para tres etapas, este tiene la facilidad para generalizarse, permitiendo la reusabilidad de cada componente de una etapa y así poder representar un proceso de *n* etapas para determinado cultivo. A continuación, se hace una explicación de las componentes presentes en el modelo para una etapa.

Para entender el modelo propuesto, se inicia determinando en qué etapa se está, esto se logra haciendo uso del cálculo de los grados día en función de la temperatura ambiental, en caso de estar ubicados en la etapa I, la acumulación de grados día debe estar entre el rango $0 \leq GDD < a$, el valor de “a” es una constante que corresponde al desarrollo y crecimiento del cultivo para la primera fase, se obtiene de investigaciones, literatura y/o vía experimentación. Una vez se tenga este valor, se realiza una comparación directa con los GDD obtenidos del proceso, de esta manera se determinará si el cultivo está en la etapa I, o en la etapa II (dado caso que $GDD \geq a$).

Posterior a ello se evaluó si el cultivo tiene presencia o ausencia de la radiación solar, condición que se determina con el huso horario, estableciendo un formato de 24 horas para el día, y con la definición de la función $F(d)$, donde se establece el rango horario, es decir si dada la evaluación $8 \leq d \leq 24$, se definirá que hay presencia de luz solar, y en caso contrario se estará en ausencia. Esto marca la diferencia entre el día y la noche. Ahora bien, cuando el modelo determina si es día o noche, en cualquiera de los dos casos se entra a un proceso cíclico, donde se constituye los tiempos de dosificación dado el caso. Estos tiempos corresponden a valores que se deben ingresar al modelo. Dicho de otra manera, se deben conocer los tiempos de dosificación tanto riego como para descanso, los cuales se pueden obtener mediante experimentación o investigaciones relacionadas.

El modelo establecerá el ciclo de la frecuencia nutricional con la suma del tiempo de riego (ta_i) y el tiempo de descanso (tb_i), de esta manera para saber el estado en que se encuentra la dosificación nutricional, se debe evaluar las condiciones $0 \leq t < ta_i$, o $0 \leq t < tb_i$, que definirá el tiempo si el sistema de dosificación nutricional esta encendido o apagado. Para finalizar, lo antes descrito es aplicado a cada una de las etapas del cultivo, para tener como modelo final el presentado en la Figura 4.5, que muestra el comportamiento de la frecuencia de dosificación nutricional de las tres etapas de crecimiento y desarrollo de cultivos hortícolas, bajo medio aeropónico.

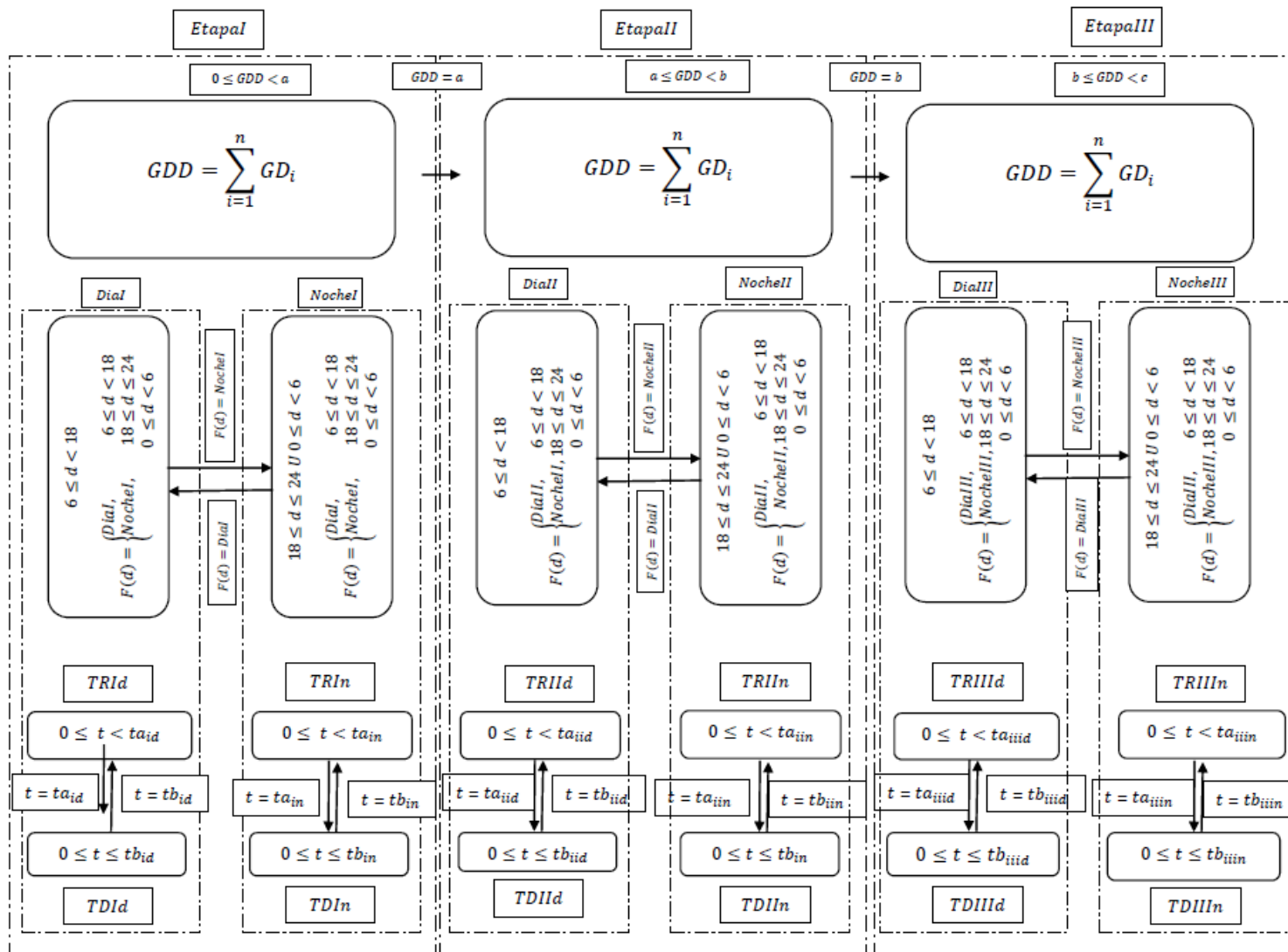


Figura 4.5: Modelo propuesto de dosificación nutricional

Considerando el proceso presentado en la Figura 4.1, y el modelo de dosificación nutricional de la Figura 4.5; se procede a realizar una caracterización de las componentes tanto continuas como discretas que intervienen en el desarrollo del proceso, como paso preliminar para desarrollar el modelado del sistema híbrido con el uso de autómatas y redes de Petri.

4.2 Componentes continuas

- Acumulación de grados día determinada por la temperatura para ciclos de 24 horas.
- Tiempo.
- Cambio de huso horario.

4.3 Componentes discretas

- Estado de desarrollo del cultivo (Etapa1, Etapa2, Etapa3).
- Estado de cambio horario (Día, Noche).
- Estado de sistema de dosificación (TR, TD).

4.4 Modelamiento de componentes continuas

Siendo GDD, acumulación de grados días para un período de tiempo t , determinada así:

$$GDD = \begin{cases} a, & 0 \leq \sum_{i=1}^m GD_i \leq a \\ b, & a < \sum_{i=1}^m GD_i \leq b \\ c, & b < \sum_{i=1}^m GD_i \leq c \end{cases} \quad (4.3)$$

a, b y c se definen como constantes dependiendo del tipo de cultivo para alcanzar la Etapa 1, la Etapa 2 y la Etapa 3 respectivamente, donde:

La acumulación de grados día para un período dado (GDD) está determinada por la acumulación de grados día (GD_i) del día i hasta el día m , como se muestra en la siguiente expresión:

$$GDD = \sum_{i=1}^m GD_i \quad (4.4)$$

Ahora, los grados día acumulados para un día i (GD_i), se determinan en función de la temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), y los umbrales de temperatura (T_b, T_u), para los cuales las plantas responden de forma negativa en caso de sobrepasarlos por períodos largos de tiempo. Se presentan seis casos donde se puede evaluar GD_i , dependiendo los umbrales de temperatura (4.5).

El primer caso, se aplica cuando la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura mínima (T_{min}) del cultivo superan la temperatura umbral (T_u), para este caso los GD_i se calculan como la diferencia entre TU y T_b .

El segundo caso, cuando T_{max} y T_{min} del cultivo, están por debajo de la temperatura base (T_b), siendo T_b la temperatura mínima requerida por el cultivo para su buen crecimiento. En este caso no se tiene en cuenta la acumulación de grados día para el día i , debido a que no hay aporte energético para el desarrollo fisiológico, por tanto GD_i será cero.

El tercer caso, donde T_{max} y T_{min} están dentro de los umbrales (T_u y T_b), GD_i será igual a la mitad de la suma de T_{max} y T_{min} , menos T_b .

Para el cuarto, quinto y sexto caso, cuando T_{max} y T_{min} , uno de los dos pasara su umbral (para T_{min} su umbral es T_b y para T_{max} , su umbral es T_u), GD_i se evaluara en la ecuaciones (4.6), (4.7), y (4.8) respectivamente.

De acuerdo a lo anterior, a continuación, se presenta las ecuaciones matemáticas para el cálculo de acumulación de grados día para el día i (GD_i).

$$GD_i = \begin{cases} TU - T_b & T_{max} > TU, T_{min} > TU \\ 0 & T_{max} < T_b, T_{min} < T_b \\ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b, & T_{max} < TU, T_{min} > T_b \\ Ecuacion (4.6), & T_{max} < TU, T_{min} < T_b \\ Ecuacion (4.7), & T_{max} > TU, T_{min} > T_b \\ Ecuacion (4.8), & T_{max} > TU, T_{min} < T_b \end{cases} \quad (4.5)$$

donde:

- T_{max} : Temperatura máxima diaria

- TU: Temperatura Umbral superior para el cultivo, temperatura a la cual el cultivo detiene sus actividades metabólicas
- Tmin: Temperatura mínima diaria
- Tb: Temperatura base o mínima requerida para el crecimiento del cultivo.
- GD_i : Grados día del día i
- m : número de días

$$\frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - Tb \right) \left(\frac{\pi}{2} - \phi_1 \right) + \alpha \cos(\phi_1) \right] \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - Tb \right) \left(\frac{\pi}{2} + \phi_2 \right) + (TU - Tb) \left(\frac{\pi}{2} - \phi_2 \right) - (\alpha \cos(\phi_2)) \right] \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - Tb \right) (\phi_2 - \phi_1) + \alpha [\cos(\phi_1) - \cos(\phi_2)] + (TU - Tb) \left(\frac{\pi}{2} - \phi_2 \right) \right] \quad (4.8)$$

$$\phi_1 = \sin^{-1} \left[\left(Tb - \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) / \alpha \right] \quad (4.9)$$

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left[\left(TU - \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) / \alpha \right] \quad (4.10)$$

$$\alpha = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (4.11)$$

Huso horario

Sea $F(d)$ el cambio de huso horario para el día y la noche. Una función que determina el cambio de estado de día a noche y viceversa, bajo el formato de 24 horas, siendo día entre las 6:00 horas y las 18 horas, y en caso contrario será noche. Como se muestra a continuación:

$$F(d) = \begin{cases} D, & 6:00 \text{ hrs} \leq d < 18:00 \text{ hrs} \\ N, & 18:00 \text{ hrs} \leq d \leq 24:00 \text{ hrs} \\ & 0:00 \text{ hrs} \leq d < 6:00 \text{ hrs} \end{cases} \quad (4.12)$$

Donde,

- D : Horas día de la etapa i
- N : Horas Noche de la etapa i

Tiempo

A pesar que los tiempos para la dosificación nutritiva son valores constantes en cada etapa, estos evolucionan y cambian en el tiempo, tanto para el cambio de estado de día-noche y noche-día, como para la evolución del desarrollo de las plantas, reflejado en el cambio de etapa por la acumulación de grados día. A continuación, se expresan los valores que puede tomar la variable tiempo.

$$t = \begin{cases} TR, & 0 < t < tai \\ TD, & 0 < t < tbi \end{cases} \quad (4.13)$$

Dónde:

t : variable tiempo

tai : tiempo de riego o duración de encendido del sistema de dosificación de la etapa i

tbi : tiempo de descanso o tiempo de apagado del sistema de dosificación de la etapa i

4.5 Modelamiento de componentes discretas

4.5.1 Estado de desarrollo y crecimiento

Se definen cuatro estados discretos. El estado S_1 expresa la Etapa 1, donde el crecimiento del cultivo es lento, siendo el primer estado del modelo. Este se activa mientras $GDD < a$. El estado S_2 , indica la Etapa 2 donde el crecimiento del cultivo es exponencial y $a \geq GDD < b$. Estado S_3 , Etapa 3 del cultivo, este presenta un crecimiento lento con tendencia constante en el tiempo y se encuentra activo mientras $b \geq GDD < c$ y finalmente el estado S_4 , correspondiente a la fase final del cultivo, su activación corresponde a valores de $GDD \geq c$, como se muestra en la Figura 4.6.

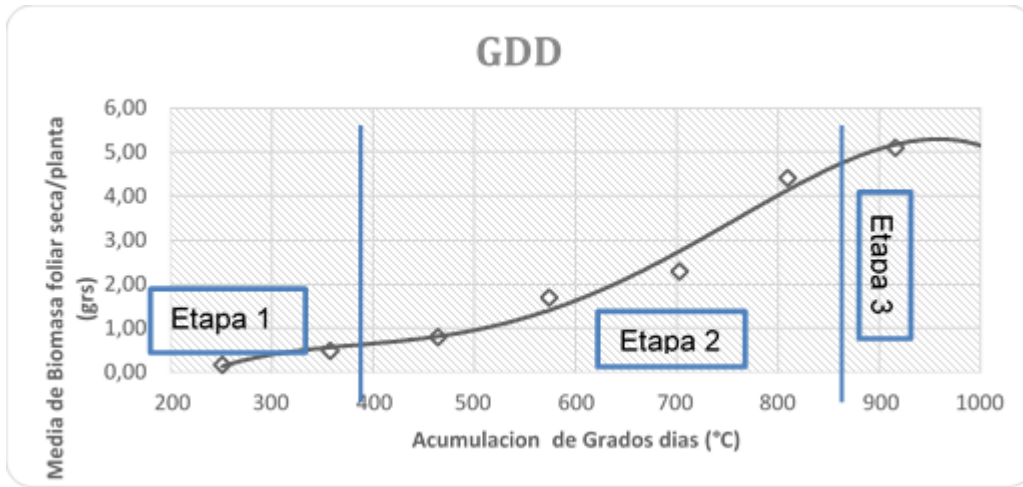


Figura 4.6: Estado de crecimiento y desarrollo

4.5.2 Estado de cambio horario

Se definen 2 estados. El estado S_d , correspondiente a las horas de sol (Día), y Estado S_n que corresponde a las horas sin presencia de luz solar (Noche).

4.5.3 Estado sistema de dosificación

Se presentan 2 estados para la representación de la dosificación nutricional. Estado TR, representa la activación del sistema de dosificación y Estado TD, indica la inactividad de la frecuencia de dosificación. Se puede ver representada como un sistema On- off de dos estados.

4.6 Especificación de componentes continuas

Se presentan las condiciones de actividad de los estados continuos entre las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo, dadas por la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n GD_i = \begin{cases} a, & \forall S_1 \rightarrow S_2 \\ b, & \forall S_2 \rightarrow S_3 \\ c, & \forall S_3 \rightarrow S_4 \end{cases} \quad (4.14)$$

Los valores a, b y c representan la transición entre un estado y otro, definiéndose como la acumulación de grados días durante un período de tiempo i necesarios para alcanzar los grados que delimitan cada etapa del cultivo, cuando $GDD = a$ se pasa del estado S_1 al estado S_2 , de igual manera cuando GDD toma los valores de b y c pasa a los estados S_3 y S_4 respetivamente.

Para el caso del cambio de día a noche, se define:

$$F(d) = \begin{cases} D, & \forall S_n \rightarrow S_d \\ N, & \forall S_d \rightarrow S_n \end{cases} \quad (4.15)$$

$F(d)$ función está definida por un día de 24 horas, cuando $F(d) = D$ se pasa del estado S_n al estado S_d , y para $F(d) = N$ se pasa del estado S_d al estado S_n .

Además, para el tiempo una función t definida para la frecuencia de dosificación puede tomar los siguientes valores

$$t = \begin{cases} ta, & \forall TR \rightarrow TD \\ tb, & \forall TD \rightarrow TR \end{cases} \quad (4.16)$$

Cuando t , función definida por el tiempo, sea $t = ta$ se pasa del estado TR al estado TD y para $t = tb$, se pasa del estado TD al estado TR .

4.7 Especificaciones de componentes discretas

Se presentan las acciones de control de cada estado discreto para las especificaciones discretas del sistema.

$$\begin{aligned} 0 \leq GDD < a, & \quad \forall s \in S_1 \\ a \leq GDD < b, & \quad \forall s \in S_2 \\ b \leq GDD < c, & \quad \forall s \in S_3 \\ GDD \geq c, & \quad \forall s \in S_4 \end{aligned} \quad (4.17)$$

La GDD varían a lo largo de la vida o etapa productiva de las hortalizas, los valores a, b y c indican el momento en cual se pasa de estado fenológico luego de haber alcanzado cierta acumulación de grados día.

Para el caso del huso horario, se define $F(d)$ como la hora en un el tiempo t .

$$\begin{aligned} 6:00 \text{ hrs} \leq d < 18:00 \text{ hrs}, & \quad \forall s \in Sd \\ 18:00 \text{ hrs} \leq d \leq 24:00 \text{ hrs}, & \quad \forall s \in Sn \\ 0:00 \text{ hrs} \leq d < 6:00 \text{ hrs} & \end{aligned} \quad (4.18)$$

En cuanto al estado de dosificación, hace referencia al tiempo de activación y desactivación de la frecuencia de riego.

$$\begin{aligned} 0 \leq t < ta, \forall s \in TR \\ 0 \leq t \leq tb, \forall s \in TD \end{aligned} \quad (4.19)$$

El estado TR estará activo mientras $0 \leq t < ta$, y el estado TD se activa cuando $0 \leq t \leq tb$

4.8 Autómata híbrido jerárquico

Definidas tanto las entidades continuas como discretas, se presenta el modelo propuesto bajo el formalismo seleccionado en el Capítulo 3 sobre autómatas híbridos jerárquicos (o HHA , por sus siglas en inglés).

Considérese autómata híbrido jerárquico definido como:

$$HHA = \langle X, S, S_0, \beta, \alpha, \text{init}, \text{Inv}, \text{Flujo}, E, F, \text{Event} \rangle$$

Dónde:

$X = \{Tmax, Tmin, t, d\}$ variables del Sistema definidas en los reales

$S_0 = \{S1\}$ estado inicial

$S = \{S_{simple}, S_{compuesto}, S_{concurrente}\}$ conjunto de estados

$S_{simple} = \{TRid, TDid, TRin, TDin, TRiid, TDiid, TRiin, TDiin, TRiud, TDiud, TRIin, TDiin\}$, conjunto de estados que presentan cero jerarquías

$S_{compuesto} = \{SdI, SnI, SdII, SnII, SdIII, SnIII, S_1, S_2, S_3\}$, conjunto de estados que presentan al menos una jerarquía

$S_{concurrente} = \{Cproductivo\}$.

$\alpha(S)$ y $\beta(S)$ son estados jerárquicos que pertenecen a S y que permiten mostrar la jerarquía para el modelo

Por ejemplo, en la Figura 4.7 de acuerdo con las definiciones previas, donde la Jerarquización de estados define la posición y lugar de cada evento, determinando la jerarquía del modelo así:

$$(Cproduccion) = \{S_1, S_2, S_3\}$$

$$\alpha(S_1) = \{SdI, SnI\}$$

$$\alpha(S_2) = \{SdII, SnII\}$$

$$\alpha(S_3) = \{SdIII, SnIII\}$$

$$\alpha(SdI) = \{TRid, TDid\}$$

$$\alpha(SdII) = \{TRiid, TDiid\}$$

$$\alpha(SdIII) = \{TRiiid, TDiiid\}$$

$$\alpha(SnI) = \{TRin, TDin\}$$

$$\alpha(SnII) = \{TRiin, TDiin\}$$

$$\alpha(SnIII) = \{TRiiin, TDiiin\}$$

$$\alpha(TRid) = \{0\}$$

$$\beta(TRid) = \{Sd\}$$

$$\beta(SdI) = \{S_1\}$$

$$\beta(S_1) = \{Cproduccion\}$$

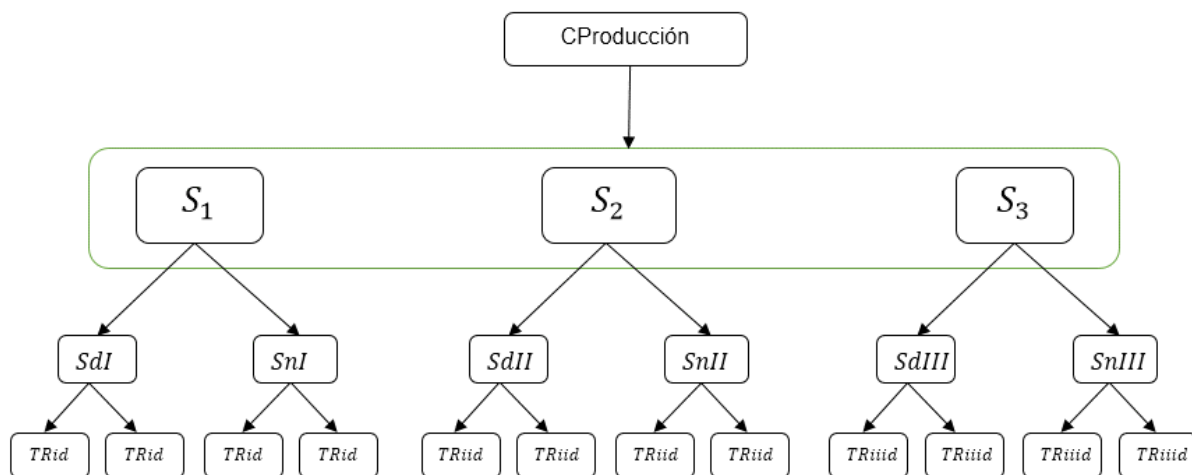


Figura 4.7: Jerarquización de estados del modelo

Dónde:

Cproducción: Se define el ciclo completo de producción en el sistema aeropónico, cuantificado en unidades de tiempo.

S₁, S₂, S₃ : Son las diferentes etapas del crecimiento de las hortalizas en el sistema, diferenciadas por el estado de desarrollo de las plantas.

SdI, SdII, SdIII: Tiempo en el cual el sistema estará sometido a la luz día (luz solar), definida para efectos del modelo como 12 horas.

SnI, SnII, SnIII: Tiempo en el cual el sistema estará sometido a la oscuridad (ausencia de luz solar), definida para efectos del modelo como 12 horas.

TR: Definido como tiempo de riego, y representa el tiempo de entrega de la dosificación nutricional para cada etapa de desarrollo en función del día o la noche.

TD: Definido como tiempo de descanso, y representa el tiempo comprendido entre un **TR** y un **TRi** para cada etapa de desarrollo en función del día o la noche.

Siguiendo con las definiciones del HHA, a continuación, se presentan las condiciones iniciales, invariantes, y transiciones entre los estados para el modelo.

Init = { $GDD = 0, t = 0$ }, condiciones iniciales definidas para la acumulación de grados día y la variable tiempo

Inv(s): Condiciones invariantes para los estados TR y TD

$$0 \leq t < ta, \forall s \in TR$$

$$0 \leq t \leq tb, \forall s \in TD$$

Ecuaciones de flujo para los estados, que representa las condiciones por las cuales un estado estará activo a la vez, ya que en el cultivo aeropónico solo podrá estar en una etapa de crecimiento y desarrollo a la vez.

$$0 \leq GDD < a, \forall s \in S_1, \text{ etapa 1}$$

$$a \leq GDD < b, \quad \forall s \in S_2, \text{ etapa 2}$$

$$b \leq GDD < c, \forall s \in S_3, \text{ etapa 3}$$

$$c \leq GDD, \forall s \in S_4 \text{ etapa final, corresponde al fin de ciclo de producción}$$

$E = \{g_1, g_2, g_3, n, d, t_a, t_b\}$ Conjunto finito de transiciones entre estados,

$$F = \{F(g_1), F(g_2), F(g_3), F(n), F(d), F(t_a), F(t_b)\}$$

Sea g, n, d, t transiciones entre de estado i a un estado j

$$F(g_1) = \{GDD = a, \forall g \in E\}, \text{ transición del estado } S_1, \text{ al estado } S_2$$

$$F(g_2) = \{GDD = b, \forall g \in E\}, \text{ transición del estado } S_2, \text{ al estado } S_3$$

$$F(g_3) = \{GDD = c, \forall g \in E\}, \text{ transición del estado } S_3, \text{ al estado } S_4$$

$$F(n) = \{f(d) = D, \forall T \in E\}, \text{ transición del estado } S_d, \text{ al estado } S_n$$

$$F(d) = \{f(d) = N \forall T \in E\}, \text{ transición del estado } S_n, \text{ al estado } S_d$$

$$F(t_a) = \{t = t_a, \forall T \in E\}, \text{ transición del estado } TR, \text{ al estado } TD$$

$$F(t_b) = \{t = t_b, \forall T \in E\}, \text{ transición del estado } TD, \text{ al estado } TR$$

$Event = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n\}$, eventos asignados a cada transición

4.9 Modelo de autómatas jerárquico

El modelo jerárquico que describe el comportamiento de la frecuencia de dosificación nutricional en medios aeropónicos presenta un esquema simple, manejado por tres autómatas finitos denominados, Etapas, Cambio Día-Noche y Tiempo de riego (TR)-Tiempo de apagado (TD) ver Figura 4.8.

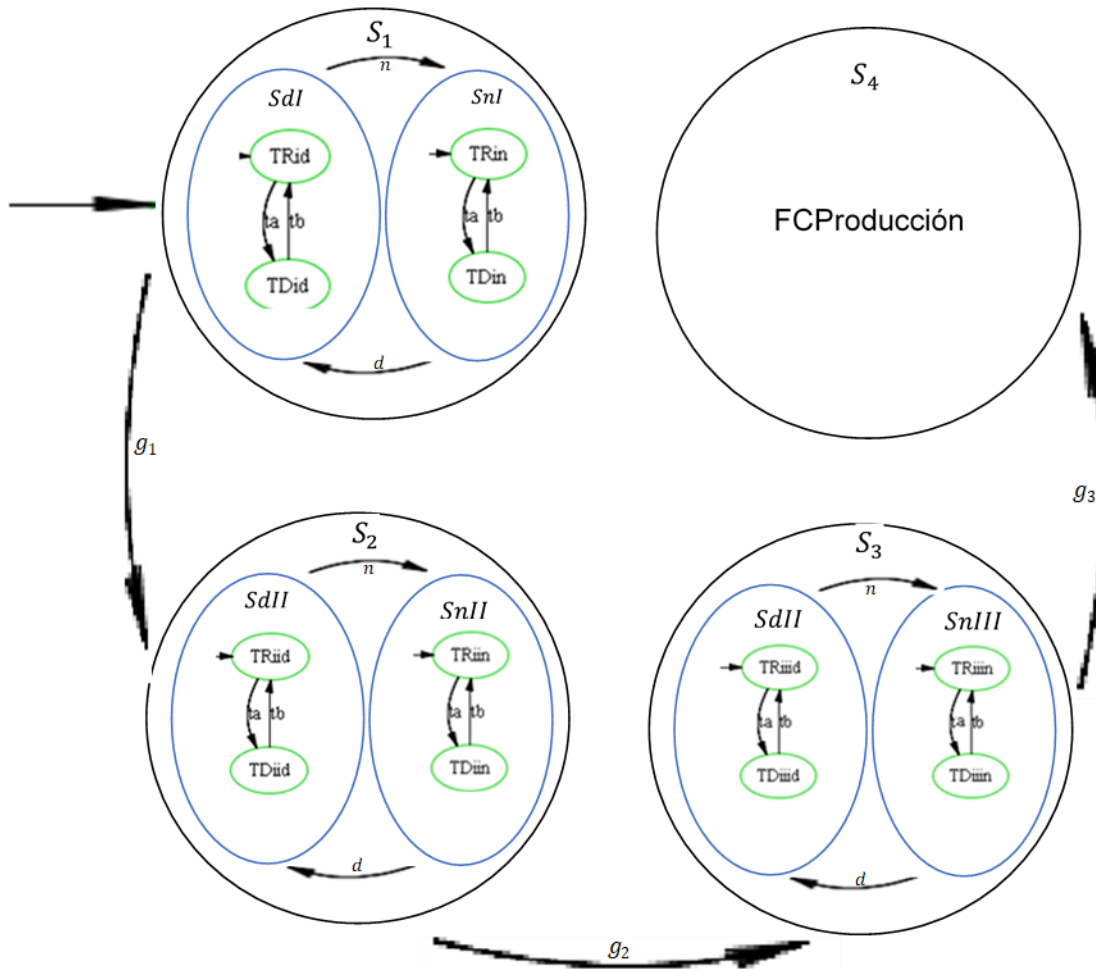


Figura 4.8 : Modelo de autómatas híbrido jerárquico de la frecuencia de dosificación

Este autómatas se ve regido por las condiciones y características impuestas por el proceso presentado en la Figura 4.1, donde se garantiza que pueda modelar satisfactoriamente el sistema. Estas condiciones son las siguientes:

- **Etapas mutuamente excluyentes**

Las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo de las plantas se deben presentar de forma seguida, sin posibilidad alguna de haber más de una etapa activa a la vez, esto garantizará que el modelo se ajuste a la realidad del proceso.

- **Proceso con inicio y fin**

El proceso debe tener una etapa de inicio y una de final, esta última deberá ser alcanzable desde la etapa inicial.

- **Proceso de un solo ciclo**

Cuando termina el ciclo de vida de la planta termina el proceso de producción

- **Procesos Internos cíclicos**

La frecuencia de dosificación y el cambio de día a noche son procesos cíclicos dentro de una misma etapa de crecimiento y desarrollo para el cultivo.

Para la validación de las condiciones anteriores se presentarán los modelos de redes de Petri jerárquicas definidas en el Capítulo 3, su capacidad de representación, análisis y validación permite entender y explicar de forma clara, y funcionalmente las estructuras de estado - transición.

4.10 Modelo red de Petri jerárquico (HPN)

En los modelos jerárquicos “La complejidad conduce a la simplicidad” [94] de tal forma que permite presentar un modelo complejo gráfico de un sistema de forma más simple, con la generación de submodelos definiendo relaciones de jerarquías entre ellos [106].

El paso directo de autómatas a red de Petri presentado en la definición 3.10, permite ilustrar en la Figura 4.9, una PN del modelo de dosificación propuesto, que representa las tres etapas de crecimiento y desarrollo de las hortalizas a partir de la frecuencia de dosificación nutricional, en esta se logra identificar que el paso de una etapa a otra muestra un modelo secuencial, donde su evolución se dará de acuerdo al crecimiento y desarrollo medido a partir de los GDD.

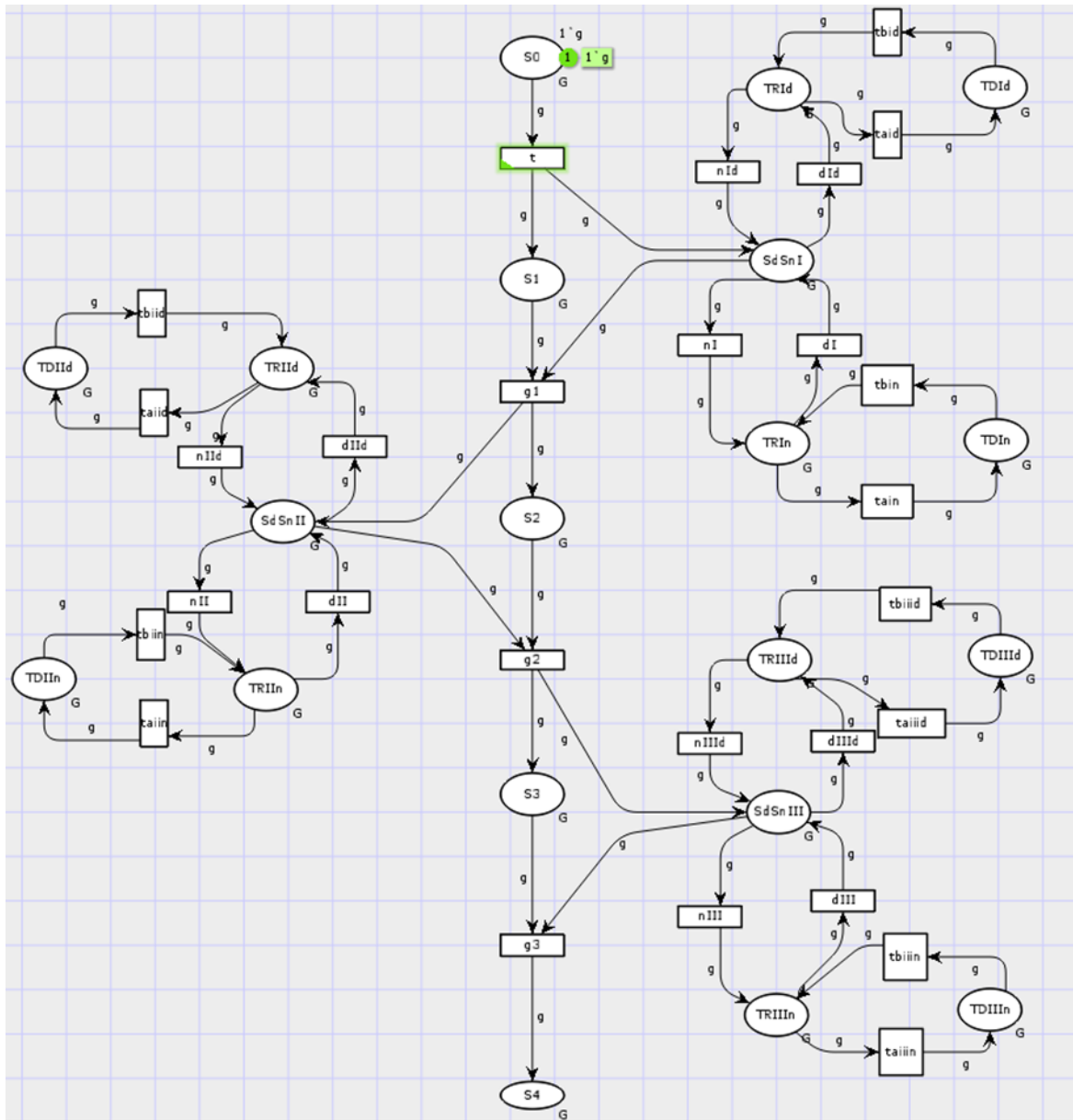


Figura 4.9: Modelo de red Petri (PN)

El modelo de la Figura 4.9, se puede reducir presentándolo como un modelo de PN jerarquizado (HPN, por sus siglas en inglés) ver Figura 4.10, donde se hace una fusión de jerarquía por transiciones [106]; que arroja como resultado una reducción de la complejidad del modelo, esta se evidencia en una red principal (Figura 4.10) y tres subredes (

Figura 4.11), que representan el sistema de la frecuencia de dosificación nutricional de todas las etapas de un cultivo, y el manejo de la reusabilidad de las subredes para cada

una de las etapas, esto lleva a una interpretación gráfica más sencilla y clara del modelo completo jerárquico del sistema, proponiendo una visión menos compleja, característica principal de los modelos jerárquicos. El modelo jerárquico completo se muestra en el anexo A.

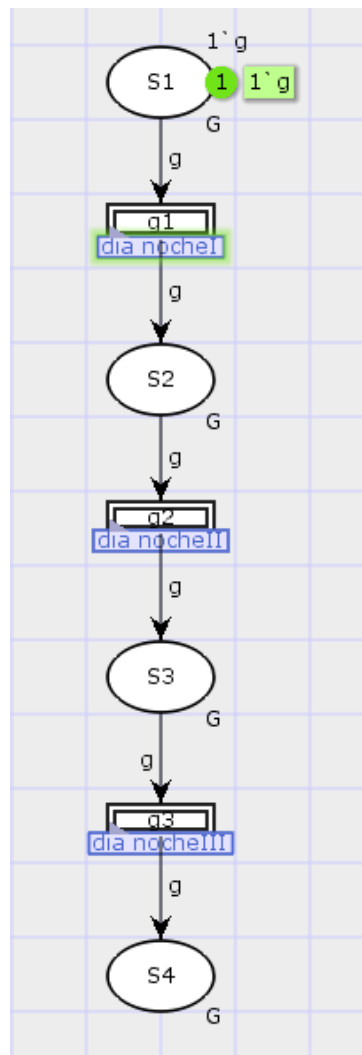


Figura 4.10: Red de Petri jerárquica (HPN) del modelo propuesto

En la Figura 4.10 se muestra la red principal del modelo jerárquico, esta se relaciona directamente con las demás subredes a través de vínculos establecidos en las transiciones

[106], y permite vincular una misma subred a varias transiciones, siendo el concepto de reusabilidad presente en los sistemas jerárquicos, favoreciendo la desagregación de un modelo complejo.

En este modelo la representación de estados $S1$, $S2$ y $S3$ corresponde a las etapas I, etapa II, etapa III respectivamente, y $S4$ pertenece a una etapa ficticia que se podría denominar estado final. $g1$, $g2$ y $g3$ son valores prestablecidos de GDD , dependen del cultivo y las condiciones ambientales para cada etapa, que definen la evolución de la red.

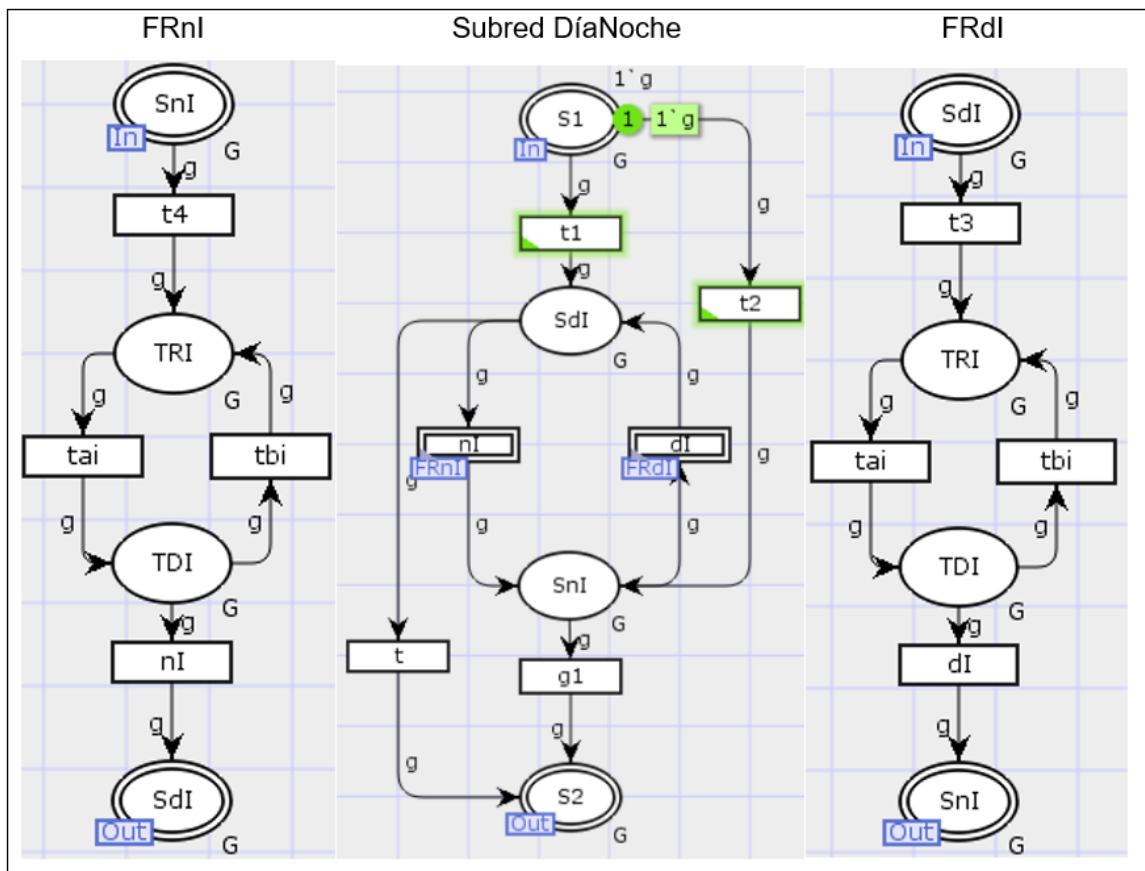


Figura 4.11: Subredes de la HPN

Una de las ventajas de presentar un modelo jerárquico, como el que se muestra en la Figura 4.11, es la facilidad para la interpretación de un sistema. En esta hay tres subredes; la subred principal Día-Noche, que representa el cambio de iluminación solar en las 24 horas del día, es decir que discrimina el tiempo que las plantas estarán en hora día con

presencia de radiación solar, como el de la noche sin presencia de la radiación solar, y las otras dos subredes representan la frecuencia de dosificación nutricional, para el día (*FRDI*, frecuencia de dosificación diurna), y para la noche (*FRNI* frecuencia de dosificación nocturna) de la etapa *I*, además estas subredes pueden ser consideradas para la representación de las otras dos etapas del modelo, así como la representación de un modelo de *n* etapas.

4.11 Análisis del sistema híbrido

Con el fin de asegurar que las condiciones impuestas por el proceso se cumplan, se establece la validación de las mismas a través de las transiciones, que determinan si el modelo híbrido se habilita o no.

Para la validación se presentará el modelo híbrido como la integración de tres autómatas finitos generales, que describirán todo el modelo como se observa en la Figura 4.12. Con la ayuda del programa *Supremica* se validarán algunas imposiciones, las demás se harán con la teoría de las redes de Petri que presenta un mayor lenguaje que los autómatas, con la ayuda del programa CPN Tools.

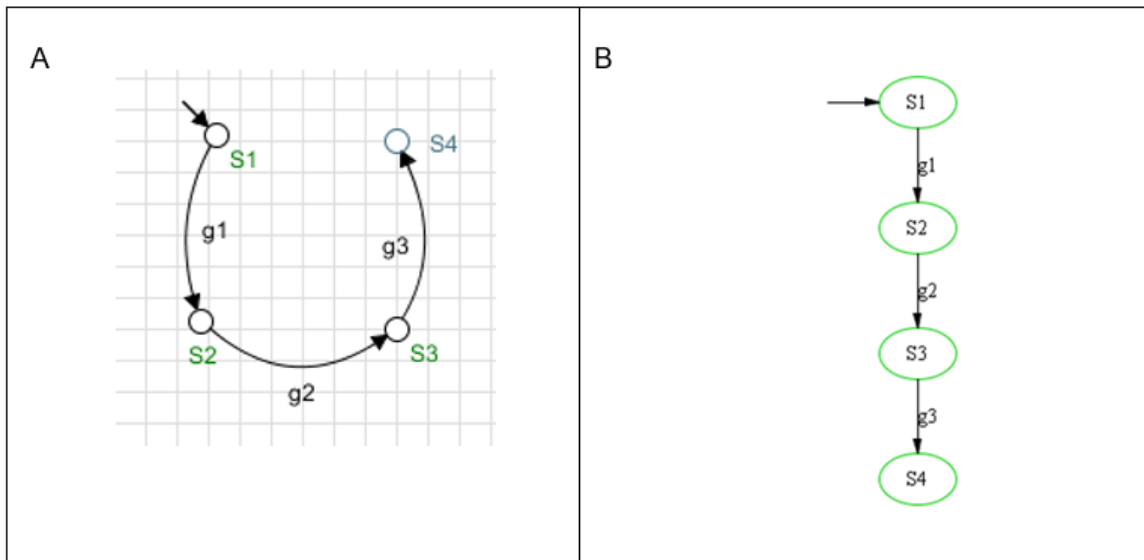


Figura 4.12: A- Modelo de autómata finito para las etapas de desarrollo B- Estados aceptados para el modelo (generados por *supremica*)

Al igual que en las redes de Petri, el modelo de autómatas jerárquico se puede integrar, en este caso en varios autómatas finitos: donde se presentan los cuatro estados de aceptación del autómata con sus eventos asociados, interpretando las tres etapas para el crecimiento y desarrollo de las plantas

Considere el modelo de autómata finito de la Figura 4.12 y definido formalmente en el capítulo 3, se puede hacer una interpretación formal, permitiendo evidenciar si el modelo cumple con las exigencias impuestas por el proceso. Así:

$$G = \langle S, \Sigma, f, \Gamma, S_0, S_m \rangle$$

Dónde:

$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, conjunto estados $\Sigma = \{g_1, g_2, g_3\}$, conjunto de eventos

$$f(S_1, g_1) = S_2 \quad f(S_2, g_2) = S_3 \quad f(S_3, g_3) = S_4 \quad f(S_1, \varepsilon) = S_1$$

$$\Gamma(S_1) = g_1 \quad \Gamma(S_2) = g_2 \quad \Gamma(S_3) = g_3$$

$$S_0 = \{S_1\} \quad S_m = \{S_4\}$$

El lenguaje generado y marcado por el autómata

$$L(G) = \{g_1, g_1g_2, g_1g_2g_3\}$$

$$L_m(G) = \{g_1g_2g_3\}$$

El estado S_4 alcanzable desde el estado S_1 dado $\therefore S_4 \exists g \in \Sigma^*: f(S, g)!$, donde S_0 es el estado inicial del autómata.

$$\overline{L_m(G)} \subset L(G)$$

Esta propiedad permite mostrar el autómata como bloqueante, demostrando que el proceso no es cíclico para las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo, y garantiza que este modelo alcanza el estado S_4 correspondiente al fin del ciclo de producción, y aun modelo secuencial.

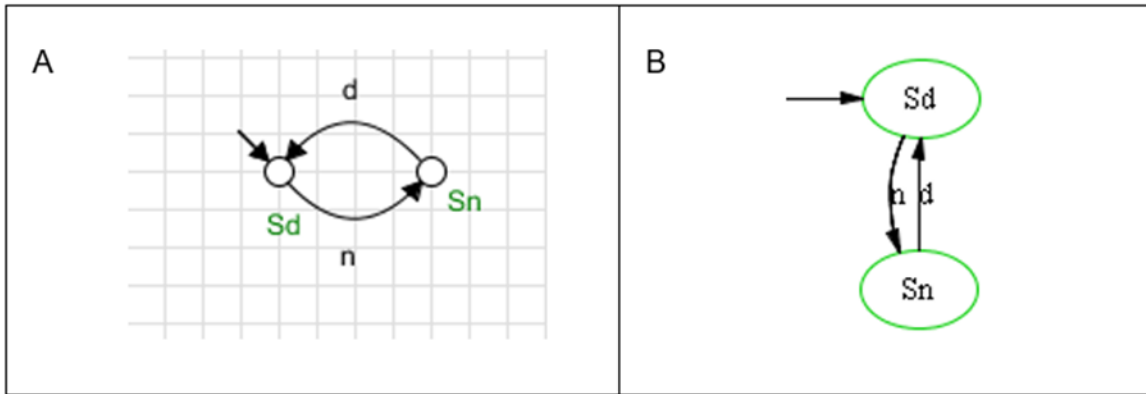


Figura 4.13: A- Modelo de autómata finito para para el cambio de Día a Noche B- Estados aceptados para el modelo (generado por *supremica*)

Considere el modelo de autómata finito para el cambio de día a noche definido como:

$$G_1 = \langle S, \Sigma, f, \Gamma, S_0, S_m \rangle$$

Dónde:

$$S = \{S_d, S_n\} \quad \Sigma = \{n, d\}$$

$$f(S_d, n) = S_n \quad f(S_d, d) = S_d \quad f(S_n, \varepsilon) = S_d$$

$$\Gamma(S_d) = n \quad \Gamma(S_n) = d$$

$$S_0 = \{S_d\} \quad S_m = \{S_d, S_n\}$$

Lenguaje marcado y generado por el autómata

$$L(G_1) = \{n, nd, ndn, ndnd, ndndn, ndndnd, ndndndn, \dots\}$$

$$L_m(G_1) = \{n, nd, ndn, ndnd, ndndn, ndndnd, ndndndn, \dots\}$$

$$\overline{L_m(G_1)} = \{n, nd, ndn, ndnd, ndndn, ndndnd, ndndndn, \dots\}$$

$$\overline{L_m(G_1)} = L(G)$$

Dado que los lenguajes marcados y generados por el autómata G_1 son iguales, se determina que este no es bloqueante, y permite modelar el cambio de día a noche de manera cíclica determinada por el huso horario.

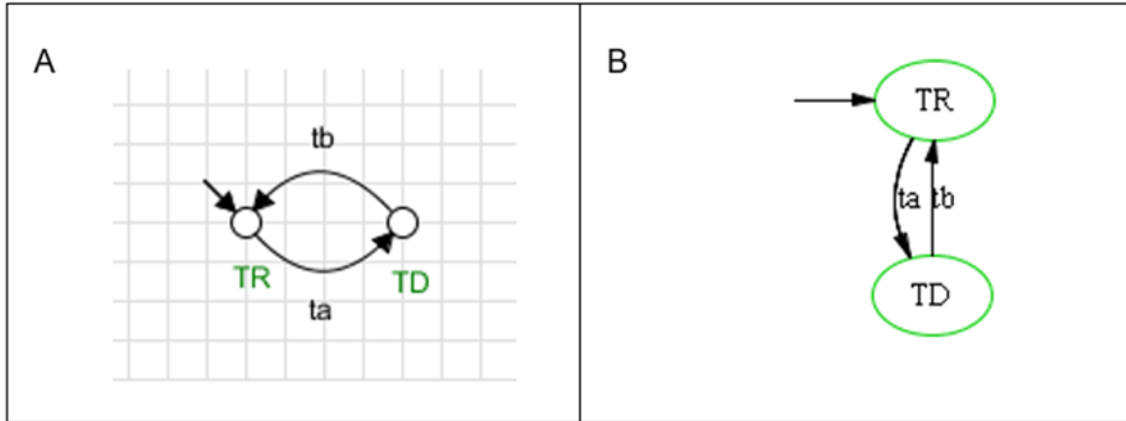


Figura 4.14: A- Modelo de autómata finito para la frecuencia de dosificación B- Estados aceptados para el modelo (generado por *supremica*)

Considere el modelo de autómata finito para la frecuencia de dosificación TR y TD definido como:

$$G_2 = \langle S, \Sigma, f, \Gamma, S_0, S_m \rangle$$

Dónde:

$$S = \{TR, TD\} \quad \Sigma = \{t_a, t_b\}$$

$$f(TR, t_a) = TD \quad f(TD, t_b) = TR \quad f(TR, \varepsilon) = TR$$

$$\Gamma(TR) = t_a \quad \Gamma(TD) = t_b$$

$$S_0 = \{TR\} \quad S_m = \{TR, TD\}$$

Lenguaje generado y marcado por el autómata G_2

$$L(G_2) = \{t_a, t_a t_b, t_a t_b t_a, t_a t_b t_a t_b, t_a t_b t_a t_b t_a, \dots\}$$

$$L_m(G_2) = \{t_a, t_a t_b, t_a t_b t_a, t_a t_b t_a t_b, t_a t_b t_a t_b t_a, \dots\}$$

$$\overline{L_m(G_2)} = \{t_a, t_a t_b, t_a t_b t_a, t_a t_b t_a t_b, t_a t_b t_a t_b t_a, \dots\}$$

$$\overline{L_m(G_2)} = L(G)$$

Como se logra evidenciar en la Figura 4.14 de los estados alcanzados por el autómata G_2 y dado que $\overline{L_m(G_2)} = L(G)$, entonces el autómata G_2 no es bloqueante, y por tanto el proceso es cíclico para la frecuencia de dosificación nutricional garantizando que se modele adecuadamente el cambio de tiempos de dosificación, en cada una de las etapas.

4.11.1 Análisis de propiedades

Para el análisis y validación del modelo propuesto se hace necesario el formalismo presentado en el capítulo 3 sobre redes de Petri, a partir del modelo de la Figura 4.10 y la Figura 4.11 se realiza el análisis de las propiedades. Por medio del Software CPN Tools se determinan las siguientes propiedades:

Estadísticas (Statistics): Detalla la información general sobre el número de elementos del árbol de Alcanzabilidad

Propiedades de Acotación (Boundedness Properties): Muestra la distribución de marcar en los lugares.

Integer Bounds: Presenta las marcas que tiene cada lugar de la red.

Propiedades de Vivacidad (Liveness Properties): Muestra las transiciones y marcas de la red.

Marcajes Muertos (Dead Markings): Marcaje que no tienen transiciones habilitadas.

Propiedades de Imparcialidad (Fairness Properties): Habilitación de cada una de las transiciones de la red.

Reporte de propiedades de CPN Tools:

- Statistics State Space
Nodes: 22
Arcs: 36
Secs: 0
Status: Full

- Boundedness Properties (Limited)

Best Integer Bounds

	Upper	Lower
Etapa'S1 1	1	0
Etapa'S2 1	1	0
Etapa'S3 1	1	0
Etapa'S4 1	1	0
FRdI'TDI 1	1	0
FRdI'TRI 1	1	0
FRdII'TDII 1	1	0
FRdII'TRII 1	1	0
FRdIII'TDIII 1	1	0
FRdIII'TRIII 1	1	0
FRnI'TDI 1	1	0
FRnI'TRI 1	1	0
FRnII'TDII 1	1	0
FRnII'TRII 1	1	0
FRnIII'TDIII 1	1	0
FRnIII'TRIII 1	1	0
día_nocheI'SdI 1	1	0
día_nocheI'SnI 1	1	0
día_nocheII'SdII 1	1	0
día_nocheII'SnII 1	1	0
día_nocheIII'SdIII 1	1	0
día_nocheIII'SnIII 1	1	0

- Liveness Properties

Dead Markings

[19]

Dead Transition Instances

None

Live Transition Instances

None

- Fairness Properties

Impartial Transition Instances

None

Transition Instances with No Fairness

None

De acuerdo con la evolución dinámica de la red de Petri jerárquica y el árbol de alcanzabilidad se pueden determinar las siguientes propiedades dinámicas para la HPN:

4.11.2 Red limitada:

En el árbol de alcanzabilidad de la Figura 4.15 es finito, en ningún marcaje se obtiene un número infinito de marcas de tal forma que:

$$M(p_i) \leq k \quad \forall p \in P, \text{ donde } k = 1 \text{ finito.}$$

Propiedad que permite demostrar que el modelo garantiza la secuencialidad del proceso, indicando que solo habrá una etapa activa a la vez, permitiendo la evolución de la red desde el estado inicial S_0 al final s_4 (etapa I a la etapa III).

4.11.3 Red segura:

El marcaje de cada nivel de jerarquía es igual 1 por tanto:

$$M(p_i) \leq 1 \quad \forall p \in P$$

4.11.4 Red viva:

En el esquema de la red de Petri y el árbol de alcanzabilidad se observa que ninguna secuencia presenta bloqueo de tal forma que:

$$\forall M_k \in M(R, M_0) \text{ secuencia de } M_0 \text{ a } M_k \exists M_{k+1} \in M(R, M_0) + 1 \in M(R, M_0)$$

Con la validación de estas tres propiedades y el árbol de alcanzabilidad (ver Figura 4.15), se puede establecer la red jerárquica (HPN), como un modelo aceptable para la representación de la dosificación nutricional de las plantas en todas las etapas, ya que presenta etapas mutuamente excluyentes, donde solo debe haber una activa a la vez, un proceso de inicio y fin con un solo ciclo, procesos internos cíclicos que permiten demostrar el cambio de día-noche, y el ciclo de dosificación nutricional.

Tabla 4.1: Lugares del modelo HPN

LUGAR	ETIQUETA/NOMBRE	MARCAJE INICIAL
P1	Etapa'S1	1
P2	Etapa'S2	0
P3	Etapa'S3	0
P4	Etapa'S4	0
P5	dia_nocheI'SdI	0
P6	dia_nocheI'SnI	0
P7	dia_nocheII'SdII	0
P8	dia_nocheII'SnII	0
P9	dia_nocheIII'SdIII	0
P10	dia_nocheIII'SnIII	0
P11	FRdI'TRI	0
P12	FRdI'TDI	0
P13	FRnI'TRI	0
P14	FRnI'TDI	0
P15	FRdII'TRII	0
P16	FRdII'TDII	0
P17	FRnII'TRII	0
P18	FRnII'TDII	0
P19	FRdIII'TRIII	0
P20	FRdIII'TDIII	0
P21	FRnIII'TRIII	0
P22	FRnIII'TDIII	0

La Tabla 4.1 muestra el marcaje inicial del modelo jerárquico, con el estado *S1* marcado, representando que el proceso inicia desde la primera etapa de crecimiento y desarrollo de las plantas, avanzando de forma secuencial; proceso que se puede evidenciar en el árbol de alcanzabilidad presentado en Figura 4.15, permitiendo apreciar como desde el estado inicial se logra llegar al estado final de forma secuencial, mostrando claramente la evolución en las tres etapas del modelo propuesto.

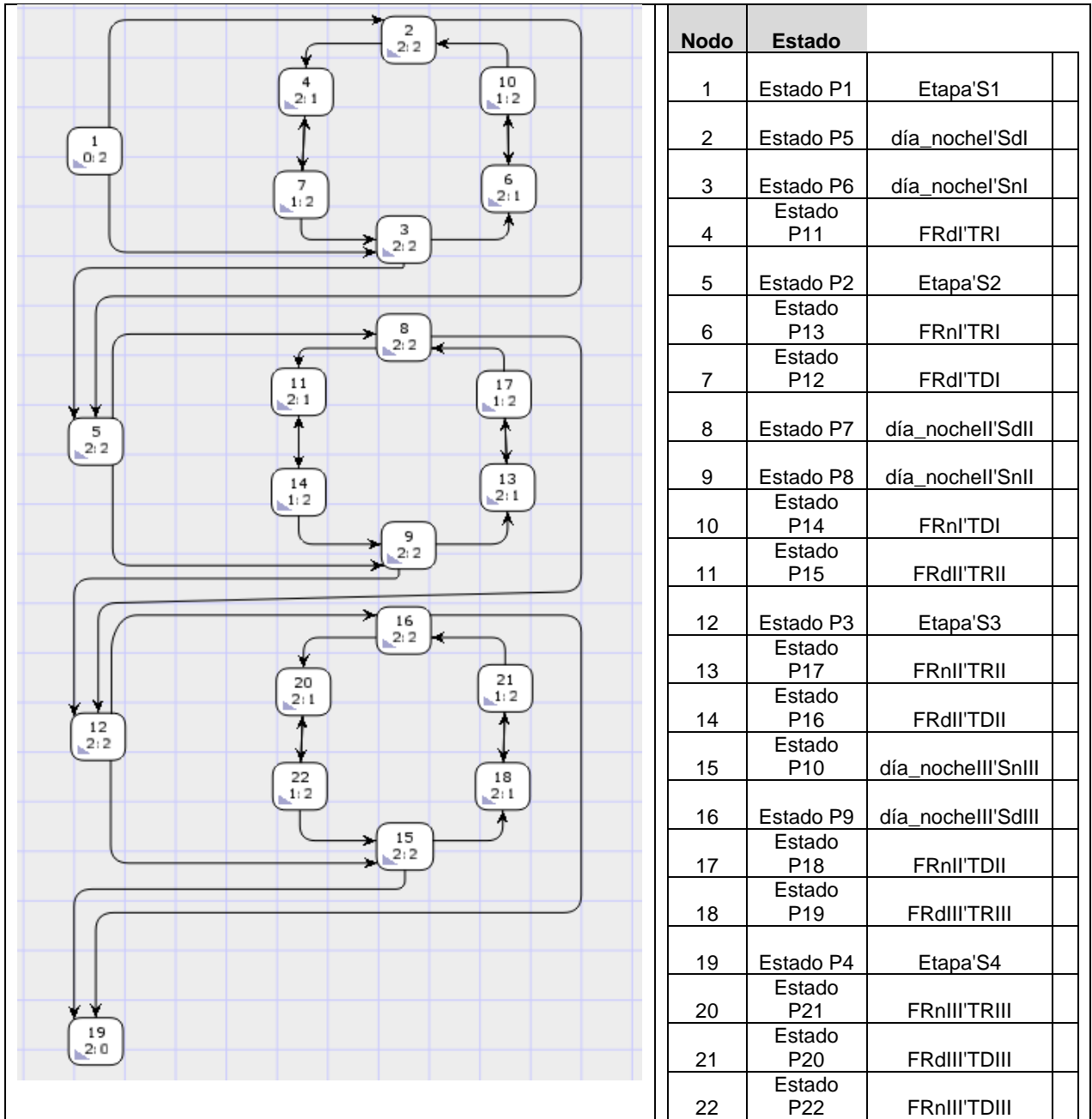


Figura 4.15: Árbol de alcanzabilidad del modelo HPN

En este capítulo se hizo la representación del modelo jerárquico y se validó la hipótesis planteada inicialmente, mostrando un modelo para la frecuencia de dosificación nutricional durante el crecimiento y desarrollo de las plantas, que se pueda representar por un autómata híbrido jerárquico.

En el capítulo siguiente, se abarcará la implementación de este modelo en controladores lógicos programables, por medio del estándar IEC 61131-3 para lenguajes de programación en PLC.

4.12 Conclusiones

- En el modelo propuesto se desarrolló la dosificación nutricional entre el estado de desarrollo de las plantas y las condiciones físicas de cambio día a noche y viceversa, de acuerdo a la acumulación de grados día. Esto permitió el modelamiento de la frecuencia de dosificación nutricional en función de las variables principales del sistema.
- Se realiza un modelo jerárquico, que hace la representación de las tres etapas de crecimiento y desarrollo de las hortalizas a partir de la frecuencia de dosificación nutricional, evidenciando el paso de una etapa a otra a partir del cálculo de grados día, en un proceso secuencial con inicio y fin.
- Teniendo un autómata y los lenguajes generado y marcado, se puede verificar la propiedad de no bloqueo, lo que permite modelar el cambio de día a noche de manera cíclica. Además del no bloqueo en las etapas de crecimiento y desarrollo, debido a que el proceso es secuencial, pasando de una etapa inicial a una final del ciclo de producción.
- En el modelo de autómata jerárquico propuesto se evidencia que cada una de sus etapas son similares en cuanto a la estructuración, siendo su diferencia los valores tomados por cada etapa, esto permite que el modelo se pueda usar para la representación de otro cultivo que contengan más etapas fenológicas bajo sistemas aeropónicos.
- La elaboración del modelo jerárquico en el software CPN Tools muestra como resultado un sistema con propiedades donde no hay secuencias infinitas de marcajes, todas las marcas alcanzables al menos habilitan una transición, o habitan una secuencia de marcajes a la que pertenecen las transiciones, entre otras que validan el modelo propuesto, garantizando que este representará adecuadamente el proceso modelado.

5. Implementación

En este capítulo se hace una implementación del modelo propuesto. Inicialmente se presentan los bloques del programa para Controladores Lógicos Programables, mostrando las subrutinas del mismo, y haciendo evidente la transparencia, entendida como la correspondencia entre el modelo de software y el modelo jerárquico. Posteriormente se muestra un diseño de experimentos para hallar tanto la frecuencia de dosificación como los GDD sobre el cultivo de Eruca Sativa (rugula) en un sistema sin suelo, que permite el control adecuado de los factores y variables del sistema. Este diseño de experimentos permiten desarrollar un sistema completamente al azar para la estructuración tanto de variables como de tratamientos, determinando por medio del análisis de medias y/o varianzas de las muestras poblacionales, la correlación entre los tratamientos y las variables respuesta. De esta manera se puede estimar la mejor frecuencia de dosificación nutricional para el cultivo aeropónico de rugula, que establezca un mejor desarrollo del cultivo.

5.1 Implementación en PLC

La programación para el modelo está orientada en el uso de subrutinas de conformidad con la norma IEC 61131-3 [107]. Estas subrutinas permiten la reusabilidad de las mismas, conduciendo de la complejidad a la simplicidad, de esta manera el modelo se expresa de forma más sencilla logrando una mejor interpretación a la hora de programar sistemas jerárquicos y/o complejos.

Con el fin de garantizar la transparencia del modelo propuesto, se presenta la implementación del modelo jerárquico con la ayuda del programa TIA portal de Siemens, y estándar internacional IEC 61131-3 para Controladores Lógicos Programables (PLC), como tres bloques principales, uno general que determinará el cambio por las diferentes etapas del cultivo y dos subrutinas, una para el cambio de día a noche y la otra para los

tiempos de dosificación, generando la completa interpretación del sistema. La programación detallada de la implementación en PLC se puede ver en el Anexo A.

La rutina que se ilustra en la Figura 5.1, se presenta el cálculo de grados día; por medio del cual se puede determinar el desplazamiento del modelo en las diferentes etapas fenológicas, garantizando el adecuado modelamiento del proceso.

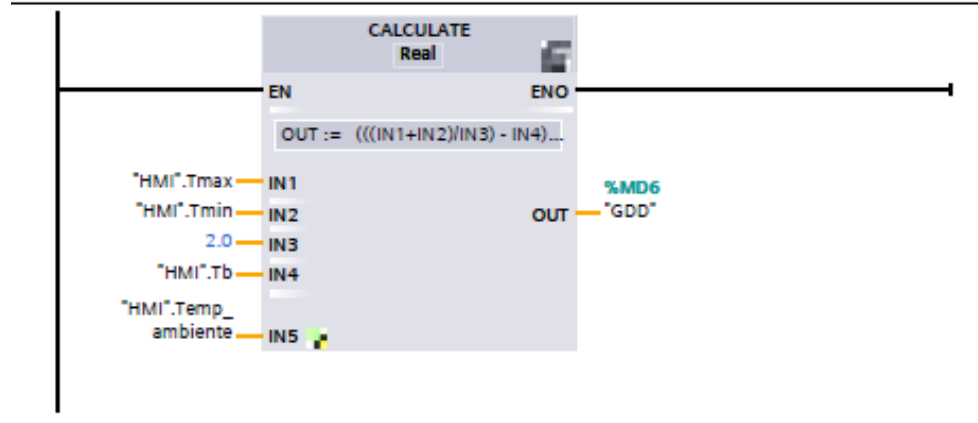


Figura 5.1: Rutina principal para el cambio entre las etapas

En la Figura 5.2 se observa los tres estados de desarrollo de un cultivo, la interacción entre cada uno de ellos está directamente vinculado con la variable "Temperatura Ambiental", siendo esta determinante para el cálculo de la acumulación de grados día en cada etapa.

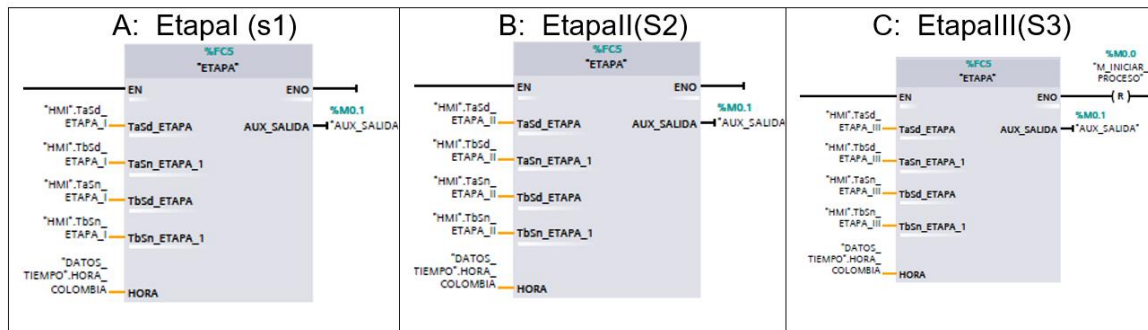


Figura 5.2: Rutina para cada etapa de desarrollo del cultivo

Los bloques presentados en la Figura 5.2 tienen el mismo funcionamiento, a cada uno se le asigna una subrutina tanto para el cambio de estado de día a noche (ver Figura 5.3), como para la frecuencia de dosificación (ver Figura 5.4).

Una de las ventajas del uso de subrutinas en el modelo aeropónico es poder ser empleadas o tomadas tanto para cada una de las etapas, como para el estado de cambio horario; por ejemplo, dada la etapa i -ésima, se le asigna una subrutina a la presencia o ausencia de la luz solar (subrutina cambio de estado de día-noche), y otra al cambio de actividad o inactividad del sistema de dosificación nutricional (subrutina frecuencia de dosificación) ya sea para el día o la noche. De esta manera cada uno de los bloques se pueden usar para las n etapas que tenga un proceso.

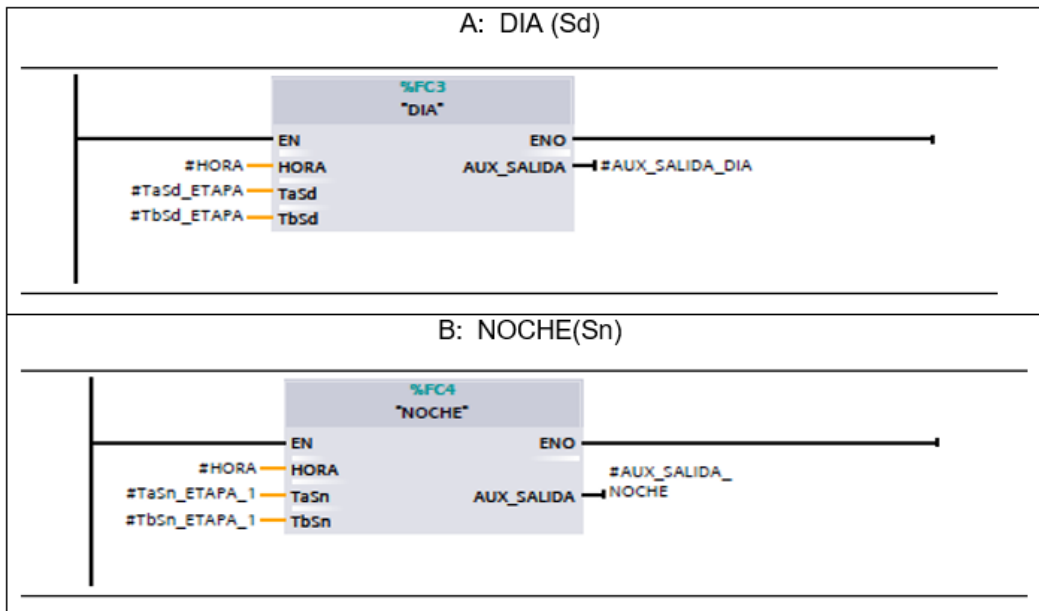


Figura 5.3: Subrutina cambio de Día-Noche

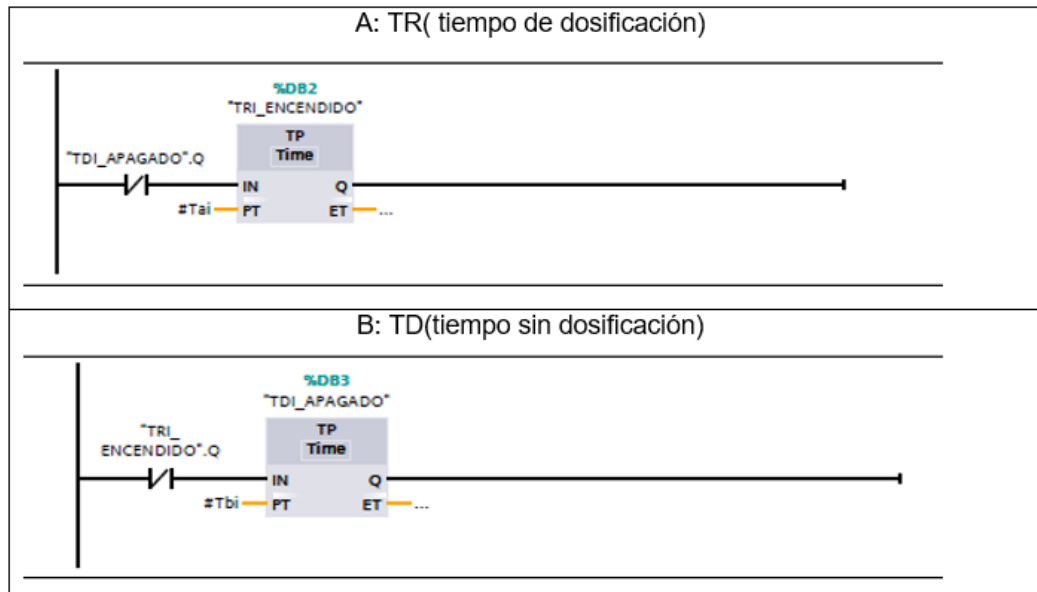


Figura 5.4: Subrutina frecuencia de dosificación (TR, TD)

5.2 Diseño experimental

El desarrollo de los ensayos para el diseño experimental se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Nacional sede Medellín, Departamento de Antioquia - Colombia. Ubicado a $6^{\circ}15'49.36''$ de latitud Norte y $75^{\circ}34'38.8''$ de longitud al oeste, con una altitud de 1470msnm.

Se realizaron dos siembras consecutivas de rugula bajo condiciones de invernadero evaluando 9 tratamientos. Las semillas de rugula fueron sembradas en aserrín a una humedad constante por 10 días, posteriormente pasa al sistema aeropónico, aplicándose una solución nutritiva por 10 días al 50% de concentración, y por 25 días al 100% de concentración de la solución empleada (Tabla 2.3), logrando así la acumulación de grados días necesarios para su comercialización y/o cosecha.

El sistema aeropónico consta de 9 camas en total, cada una con 1 metro cuadrado y 36 sitios de 4 plantas en promedio por sitio (Figura 2.3), en él se controlaron de forma independiente los 9 tratamientos, empleando la misma solución nutritiva, estableciendo un rango de operación para las variables relacionadas con la solución, como lo son la conductividad eléctrica, pH y temperatura.

El diseño experimental se realizó totalmente al azar, con un arreglo factorial 3x3, tres tiempos de riego (*TR*) y tres tiempos de descanso (*TD*) con dos repeticiones, para un total de 9 tratamientos diferentes (Tabla 5.3). La evaluación de dosificación se realizó durante las tres etapas de desarrollo fenológico de la planta, entregando la misma dosificación en el día y en la noche.

5.2.1 Evaluación del experimento

El experimento se realizó completamente al azar tanto espacial como temporalmente, se realizaron dos repeticiones, donde se evaluaron dos factores (*TR* tiempo de dosificación y *TD* tiempo sin dosificación), con tres niveles cada uno, dando como resultado 9 tratamientos (Tabla 5.1). Además de garantizar el bloqueo o valor constante de las demás variables.

Tabla 5.1: Factores y niveles para la evaluación

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
TR	TR1	TR2	TR3
TD	TD1	TD2	TD3

Tabla 5.2: Valores de los tiempos de riego y descanso evaluados

Tiempo Riego			
Nivel	TR1	TR2	TR3
Tiempo (Seg)	5	10	15
Tiempo Descando			
Nivel	TD1	TD2	TD3
Tiempo (Seg)	120	210	300

En el diseño se tomaron como referencia rangos de dosificación que van desde 1 a 15 segundos de *TR* y de 1 a 5 minutos en *TD*, seleccionando entre estos rangos tres valores para cada tiempo.

Tabla 5.3: Tratamientos evaluados

TIEMPO DE DESCANSO (TD)	TIEMPO DE RIEGO (TR)					
	TR1		TR2		TR3	
TD1	T1	TR1TD1	T2	TR2TD1	T3	TR3TD1
TD2	T4	TR1TD2	T5	TR2TD2	T6	TR3TD2
TD3	T7	TR1TD3	T8	TR2TD3	T9	TR3TD3

Variables respuesta

En la evaluación de los tratamientos sobre las plantas se consideraron tres variables de repuesta para el experimento, valorando su incidencia en el crecimiento y desarrollo del cultivo a lo largo de su etapa fenológica en un sistema aeropónico. A continuación, se presentan las variables consideradas:

PFF: Peso fresco Foliar. Es un indicativo de acumulación de biomasa fresca foliar en determinada etapa de desarrollo de la planta.

PSF: Peso seco foliar. Cantidad de biomasa seca de las hojas y tallos, medida luego de someterse una temperatura de 55 °C y llegar a un peso constante.

PFR: Peso fresco radicular. Biomasa fresca de la zona radicular de las plantas, medida en determinada etapa de desarrollo.

PSR: Peso seco radicular. Biomasa seca de la zona radicular de las plantas, medida luego de someterse una temperatura de 55 °C y llegar a un peso constante.

5.2.2 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se usó el software R [108], con los paquetes Agrícola [109] y Car [110]. En este sus estimaciones se llevaron a errores estándar y los límites a una confianza del 95%. Se realizó una estimación de los valores esperados de crecimiento

medio relativo y sus varianzas, a partir de los datos de peso de la planta replicada en cada intervalo de tiempo, modelando así el desarrollo y crecimiento del cultivo.

En la evaluación de los supuestos de normalidad para las variables se usó la familia Box-Cox para encontrar lambda (λ) de la transformación de las variables que mejor las normaliza a través de la siguiente expresión:

$$Y^* = \frac{Y^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Dónde:

Y^* Es la variable de trasformada, Y es la variable cruda, y λ es el factor de trasformación

Tabla 5.4: Valores de lambda, factor de trasformación

Variable	λ
PFF	0,1443
PSF	0,1394
PFR	0,2198
PSR	0,1742

Ya teniendo los datos normalizados, se procede a hacer el análisis de incidencia de cada variable respuesta en los tratamientos realizados.

5.2.3 Resultados y discusión

Análisis descriptivo

Las Tabla 5.5 y Tabla 5.6, muestran los datos de producción de biomasa seca foliar, y biomasa seca radicular, presentando cálculo de medias, desviación estándar, y coeficiente de variación para las variables respuesta a los 9 tratamientos.

74 Modelo híbrido para la dosificación automática de nutrientes en un sistema aeropónico

Tabla 5.5: Biomasa foliar

dia	tto	p.pff	sd.pff	cv.pff	dia	tto	p.psf	sd.psf	cv.psf
10	1	4,489	2,312	51,501	10	1	0,429	0,222	51,756
10	2	5,123	2,916	56,919	10	2	0,456	0,249	54,636
10	3	2,879	2,241	77,856	10	3	0,278	0,190	68,183
10	4	4,052	2,540	62,675	10	4	0,401	0,228	56,896
10	5	3,638	3,463	95,181	10	5	0,350	0,298	85,162
10	6	2,934	1,869	63,700	10	6	0,290	0,183	63,041
10	7	3,990	2,334	58,507	10	7	0,376	0,213	56,643
10	8	4,497	2,435	54,158	10	8	0,419	0,207	49,445
10	9	5,292	2,531	47,827	10	9	0,512	0,228	44,593
25	1	53,846	15,553	28,885	25	1	3,976	1,137	28,601
25	2	57,406	40,526	70,596	25	2	4,700	2,977	63,337
25	3	43,978	24,469	55,640	25	3	3,548	1,725	48,622
25	4	49,380	32,304	65,419	25	4	4,658	2,871	61,643
25	5	62,860	31,437	50,012	25	5	5,176	2,347	45,350
25	6	66,880	30,404	45,461	25	6	5,160	2,521	48,849
25	7	48,004	28,894	60,190	25	7	3,318	2,009	60,550
25	8	60,680	28,388	46,783	25	8	4,144	1,918	46,279
25	9	76,240	38,761	50,840	25	9	5,958	2,664	44,717
35	1	93,723	61,285	65,390	35	1	5,866	4,249	72,430
35	2	89,080	60,875	68,337	35	2	6,810	5,420	79,589
35	3	144,651	87,996	60,833	35	3	8,416	4,571	54,318
35	4	117,318	73,370	62,540	35	4	8,061	4,937	61,240
35	5	68,231	50,668	74,260	35	5	4,601	3,606	78,368
35	6	99,421	49,705	49,995	35	6	7,427	4,240	57,091
35	7	133,625	99,092	74,157	35	7	7,467	5,131	68,710
35	8	88,843	66,183	74,494	35	8	5,807	4,367	75,204
35	9	96,328	70,061	72,732	35	9	6,477	5,583	86,202

día: día de evaluación después de la siembra

tto: tratamiento

p.pff: peso fresco foliar

p. sf: peso seco foliar

sd: desviación estándar

cv: coeficiente de variación

Tabla 5.6: Biomasa radicular

dia	tto	p.pfr	sd.pfr	cv.pfr	dia	tto	p.psr	sd.psr	cv.psr
10	1	1,367	0,800	58,553	10	1	0,080	0,047	58,630
10	2	1,459	0,862	59,087	10	2	0,088	0,058	65,783
10	3	0,859	0,742	86,331	10	3	0,051	0,040	78,131
10	4	1,068	0,666	62,326	10	4	0,067	0,039	58,887
10	5	1,295	1,175	90,764	10	5	0,079	0,074	93,677
10	6	0,927	0,669	72,186	10	6	0,049	0,044	88,931
10	7	0,825	0,557	67,535	10	7	0,063	0,043	68,600
10	8	1,313	0,806	61,397	10	8	0,087	0,054	61,554
10	9	1,323	0,730	55,181	10	9	0,102	0,053	52,042
25	1	9,290	3,641	39,189	25	1	0,820	0,398	48,505
25	2	8,906	5,954	66,857	25	2	0,668	0,484	72,504
25	3	6,570	3,375	51,372	25	3	0,498	0,311	62,466
25	4	7,840	4,417	56,344	25	4	0,686	0,402	58,587
25	5	10,740	5,028	46,818	25	5	0,786	0,335	42,612
25	6	10,088	5,598	55,494	25	6	0,876	0,520	59,364
25	7	7,338	4,466	60,867	25	7	0,506	0,348	68,867
25	8	7,880	5,176	65,687	25	8	0,620	0,397	63,959
25	9	12,280	6,309	51,378	25	9	0,974	0,499	51,184
35	1	19,800	13,434	67,850	35	1	1,444	1,142	79,080
35	2	17,469	12,672	72,540	35	2	1,165	0,809	69,432
35	3	26,259	16,966	64,611	35	3	1,851	1,418	76,584
35	4	18,226	8,598	47,172	35	4	1,322	0,827	62,559
35	5	12,564	7,479	59,530	35	5	0,840	0,514	61,219
35	6	15,462	7,695	49,768	35	6	1,090	0,594	54,539
35	7	19,858	15,249	76,792	35	7	1,451	1,193	82,219
35	8	15,032	8,579	57,070	35	8	1,090	0,654	59,997
35	9	17,001	14,209	83,577	35	9	1,178	1,070	90,839

día: día de evaluación después de la siembra

tto: tratamiento

p.pfr: peso fresco radicular

p.sr : peso seco radicular

sd: desviación estándar

cv: coeficiente de variación

Análisis de varianza

Al hacer el análisis de varianza se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.7, donde el valor p de $0.299 >$ que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, esto indica que se puede concluir con una confianza del 95% la no existencia de diferencias significativas entre los 9 tratamientos para la variable respuesta biomasa fresca foliar. Obsérvese en la Gráfica 5.1, se evidencia una tendencia exponencial igual, con la misma trazabilidad en los 9 tratamientos.

Tabla 5.7: Análisis de varianza para peso fresco foliar de los 9 tratamientos

PESO FRESCO FOLIAR						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
exp	1	41.5	41.5	31.542	3.33e-08	***
día	1	1426.4	1426.4	1085.11	<2e-16	***
tto	8	12.6	1.6	1.196	0.299	
día: tto	8	11.5	1.4	1.096	0.365	
Residuals	475	624.4	1.3			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Gráfica 5.1: Biomasa fresca foliar de los 9 tratamientos

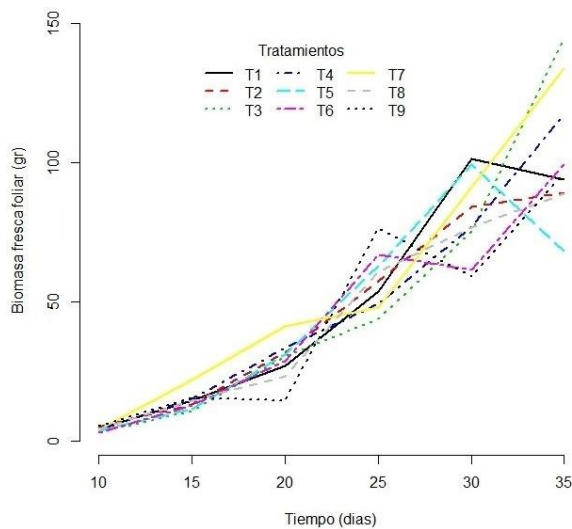
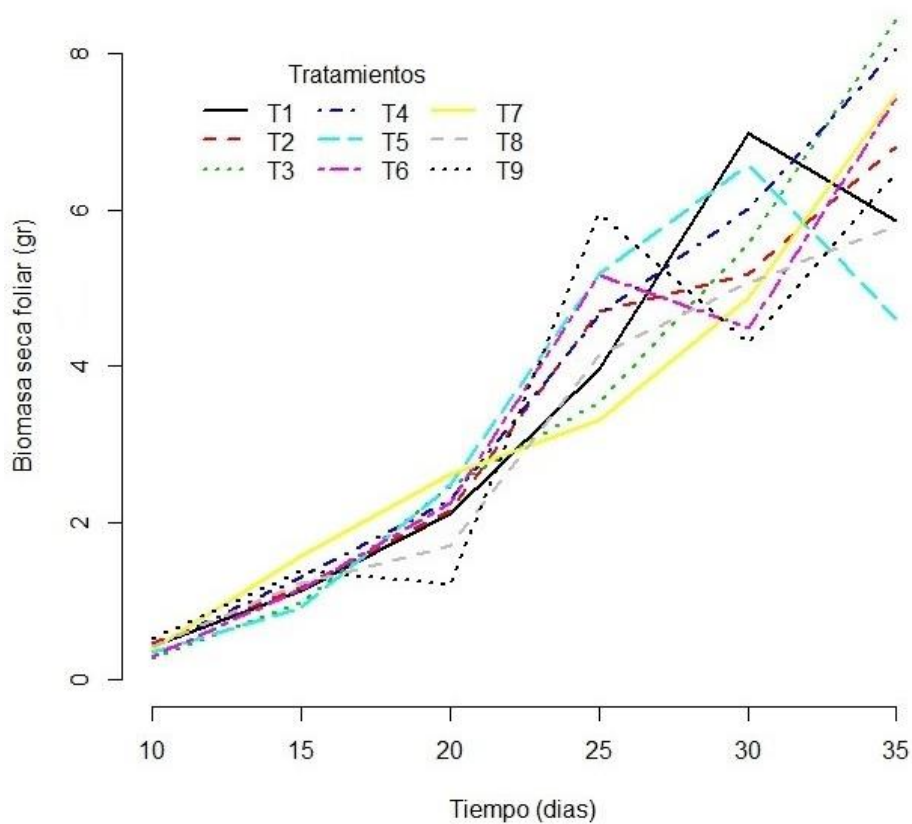


Tabla 5.8: Análisis de varianza para biomasa seca foliar

PESO SECO FOLIAR						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
exp	1	30.0	30.0	52.234	1.98e-12	***
dia	1	514.1	514.1	895.775	<2e-16	***
tto	8	2.4	0.3	0.515	0.846	
dia:tto	8	5.0	0.6	1.098	0.363	
Residuals	475	272.6	0.6			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Gráfica 5.2: Ganancia de biomasa seca foliar de los 9 tratamientos



Con respecto a la biomasa seca foliar se presentan en la Gráfica 5.2 los 9 tratamientos que corresponden a la frecuencia de dosificación para el cultivo de rugula, se evidencia que la producción de biomasa seca en el tiempo presenta la misma tendencia para todos

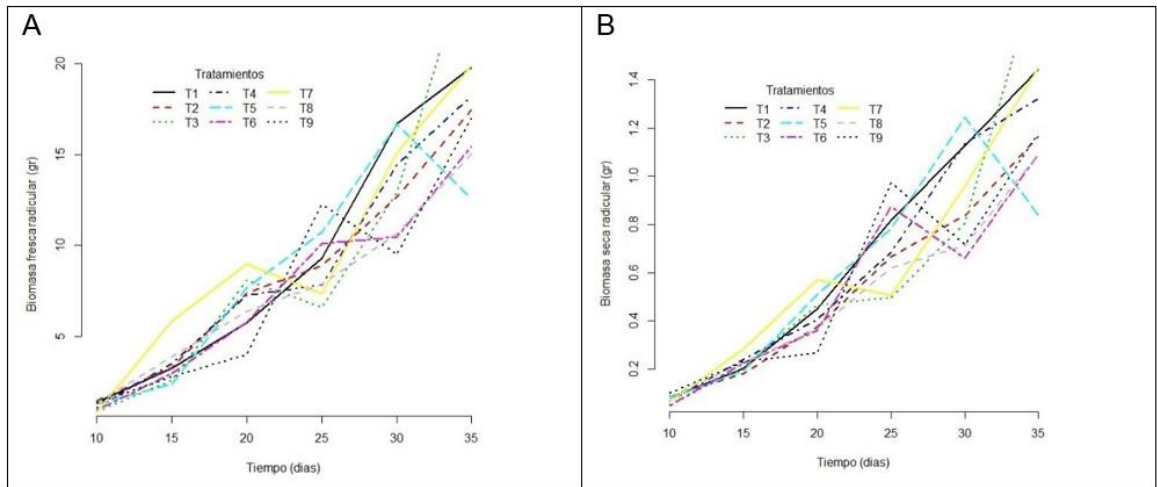
los tratamientos, al igual que en la Tabla 5.8 de análisis de varianza para la misma, donde el valor de $p=0.846$ es mayor que una significancia del 5%, por ello se puede expresar con una confianza del 95% que no existen diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de la variable respuesta biomasa seca foliar.

Al igual como se puede observar en la Gráfica 5.3 y en la Tabla 5.9, tanto para biomasa seca radicular como para la biomasa fresca radicular, el p evaluado es mayor al nivel de significancia, entonces se puede asegurar con la confianza del 95% que no existe diferencias significativas en cuanto a la producción de biomasa radicular, ya sea fresca o seca entre los 9 tratamientos para la frecuencia de dosificación nutricional.

Tabla 5.9: Análisis de varianza para biomasa seca foliar y radicular

PESO FRESCO RADICULAR						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
exp	1	5.7	5.7	5.282	0.022	*
dia	1	831.0	831.0	771.782	<2e-16	***
tto	8	9.9	1.2	1.154	0.326	
dia:tto	8	9.5	1.2	1.104	0.359	
Residuals	475	511.5	1.1			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
PESO SECO RADICULAR						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
exp	1	32.5	32.5	54.149	8.23e-13	***
dia	1	535.7	535.7	892.517	<2e-16	***
tto	8	2.4	0.3	0.505	0.852	
dia:tto	8	5.1	0.6	1.066	0.386	
Residuals	475	285.1	0.6			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Gráfica 5.3: A: Ganancia de biomasa fresca radicular, B: Ganancia de biomasa seca radicular

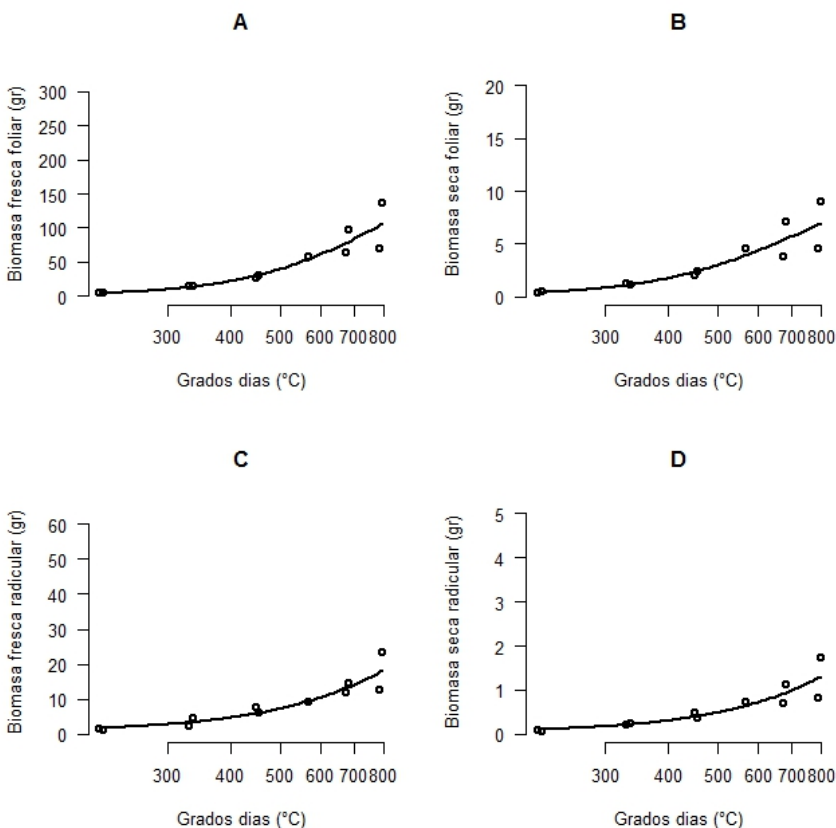


De acuerdo al anterior análisis estadístico, para los 9 tratamientos de frecuencia de dosificación para el cultivo de rugula, no hay diferencias significativas entre los diferentes rangos seleccionados tanto para TR (Tiempo de Dosificación) como para TD (Tiempo sin dosificación). Es de aclarar que la frecuencia de dosificación empleada en cada tratamiento, se aplicó tanto para el día como la noche; al igual que para las diferentes etapas filológicas del cultivo, dado que el diseño experimental presentado en este capítulo tenía como objetivo determinar la dosificación nutricional a nivel general para la rugula en un medio aeropónico.

5.2.4 Acumulación de grados día para la rugula

La GDD para la rugula se evaluó hasta el día 35. En el experimento las temperaturas diurnas máximas registradas fluctuaron entre 31 °C y 37°C, las mínimas entre 16 y 19°C, logrando llegar a una acumulación de grados día de 800°C, como se evidencia en la Gráfica 5.4. Además, es de anotar que solo se llegó hasta la etapa 2 donde el crecimiento y desarrollo presenta una curva exponencial según la teoría de Lallana, siendo este un punto óptimo para la cosecha, ya que presenta las características exigidas por el mercado, referente que se tuvo para el experimento.

Gráfica 5.4: Modelo de acumulación de grados día ajustado a la curva de crecimiento general Gompertz para cada una de las cuatro variables de respuesta.



5.3 Conclusiones

- El uso de subrutinas permite la facilidad para la reusabilidad de las mismas, haciendo una adecuada interpretación, y disminuyendo el tiempo de programación para representar un proceso de n etapas de cualquier cultivo hortícola.
- En la evaluación de la frecuencia de dosificación nutricional para la rugula, se encontró que los tratamientos empleados presentaron el mismo desarrollo y crecimiento durante todo el período evaluado, por tanto, se puede usar el tratamiento que presenta menor ciclos de riego por hora, dado que es posible evidenciar una disminución en el consumo de energía.

-
- Las no diferencias entre los tratamientos se deben principalmente a la escogencia del rango para los tiempos de dosificación, por experimentación previa se tenía conocimiento del comportamiento del cultivo en el sistema, que dio cabida para manejar un rango acotado en los tiempos de dosificación del diseño de experimentos.
 - A pesar que la temperatura de cultivo de rugula en los experimentos estuvo siempre por encima de su temperatura óptima, su desarrollo fue bueno. Sin embargo, es posible tener un mayor desarrollo realizando la experimentación en un clima más apropiado para el cultivo de rugula, donde se tenga una temperatura media de 14 grados.

6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

- La mayoría de las investigaciones en sistemas a eventos discretos se enfocan en el sector industrial con procesos de manufactura. Sin embargo, el sector agrícola con la tecnificación agraria no es ajeno a presentar un gran potencial como objeto de estudio, la incursión de la tecnología al sector en un futuro cercano, donde se establecerán políticas de seguridad alimentaria, que requieran optimizar los recursos en relación al volumen de la producción, calidad, y homogeneidad del producto. Esta necesidad es posible tratarla desde la automatización con herramientas de sistemas a eventos discretos como las redes de Petri y autómatas que permiten modelar procesos con dinámicas continuas y discretas, expresando de forma clara el modelado de un sistema por su representación gráfica, formalismo, y robustez estructural.
- Se materializan en este proyecto los avances recientes en una técnica específica de cultivo sin suelo como lo es la aeroponía, se desarrolla un modelo para la frecuencia nutricional que permite de manera inicial demostrar las bondades de la técnica, y el perfeccionamiento de las estrategias de automatización aplicadas específicamente a la agricultura del futuro, que servirán de base para las posteriores investigaciones en esta área.
- Para trabajar sobre el modelo propuesto en cualquier cultivo se debe contar con la caracterización de la fenología expresada en grados día, además de conocer los tiempos tanto de TR como de TD, para el día y la noche del cultivo en el sistema aeropónico.

- Los ensayos experimentales, en el desarrollo de la implementación, arrojaron resultados satisfactorios para ser usados en el modelo de dosificación propuesto, dado que físicamente en los 9 tratamientos las plantas obtuvieron el mismo desarrollo. Además, en el análisis estadístico para la estimación del crecimiento medio relativo, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a la producción de biomasa entre los tiempos empleados para la frecuencia de dosificación del cultivo de rugula. Por lo anterior es posible emplear los tiempos de dosificación como dato de entrada, tanto para la dosificación diurna como nocturna, comprendida en los rangos que van de 5 a los 15 segundos para el TR y de 120 a 300 segundos para la inactividad o TD.
- El modelo de automatismo propuesto para el desarrollo y crecimiento de las plantas en un medio aeropónico, en función de la frecuencia nutricional, fue posible representarlo, desarrollarlo y validarlo bajo el formalismo de un autómata híbrido jerárquico, generando la vinculación de las variables más influyentes del proceso, representando la variabilidad entre el estado de desarrollo de las plantas y las condiciones físicas del cambio de día a noche.
- Las redes de Petri jerárquicas permiten modelar sistemas complejos que presentan tanto dinamisismos continuos como discretos, haciendo una reducción del modelo, pasando de la complejidad a la simplicidad vía reusabilidad. Esto permite que el modelo de dosificación propuesto se pueda generalizar para cualquier tipo de cultivo bajo la técnica aeropónica, donde se puede tener un mayor número de etapas, si su desarrollo fenológico lo requiere.
- El modelo de autómata híbrido propuesto es totalmente transparente, se logra evidenciar la correspondencia existente entre el modelo, el formalismo y finalmente el programa, según código IEC 61131.

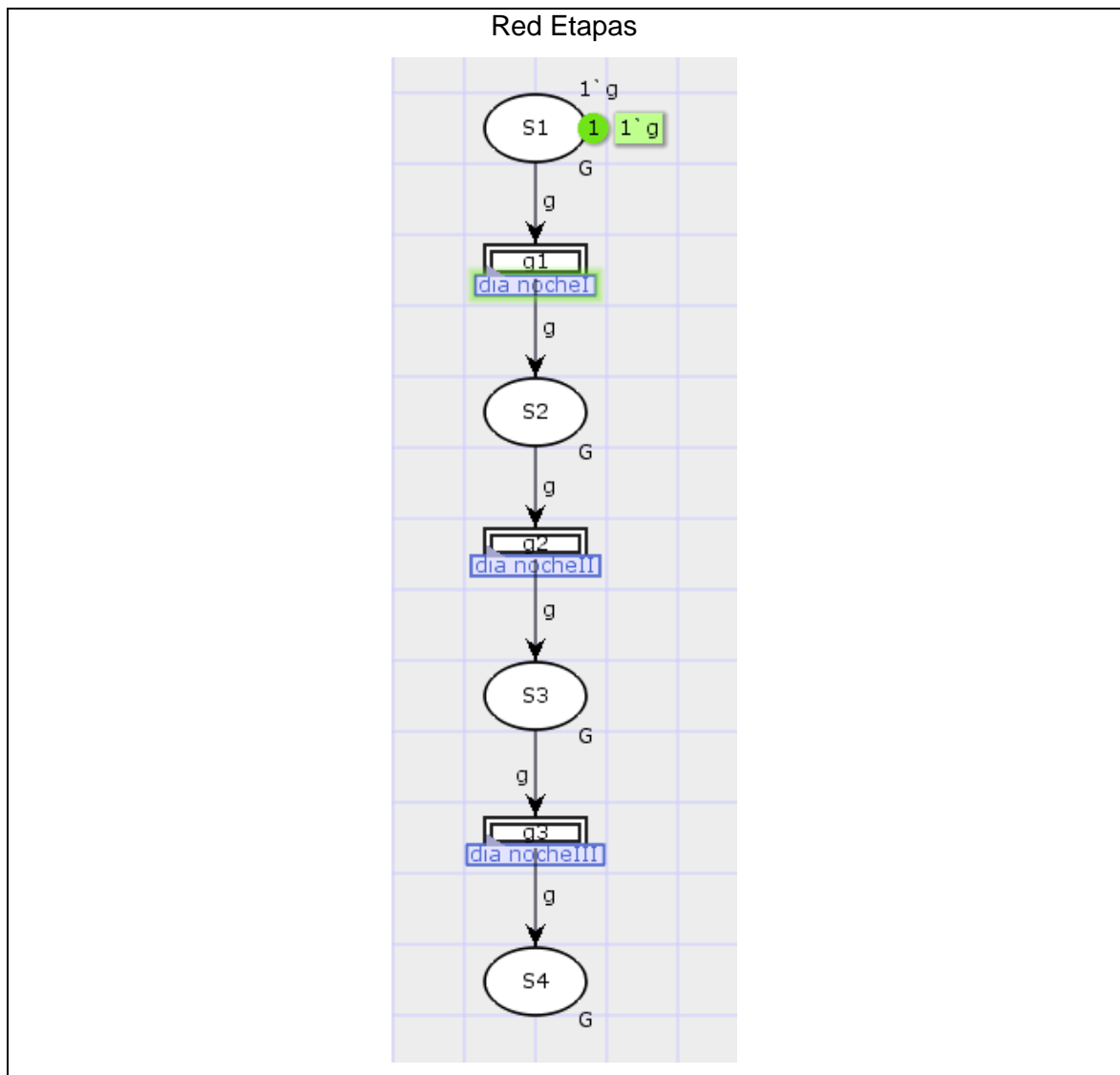
6.2 Trabajos futuros

- El estado actual de las investigaciones en cultivos sin suelo permite evidenciar una alta dependencia tecnológica, relacionada con el control de las variables que

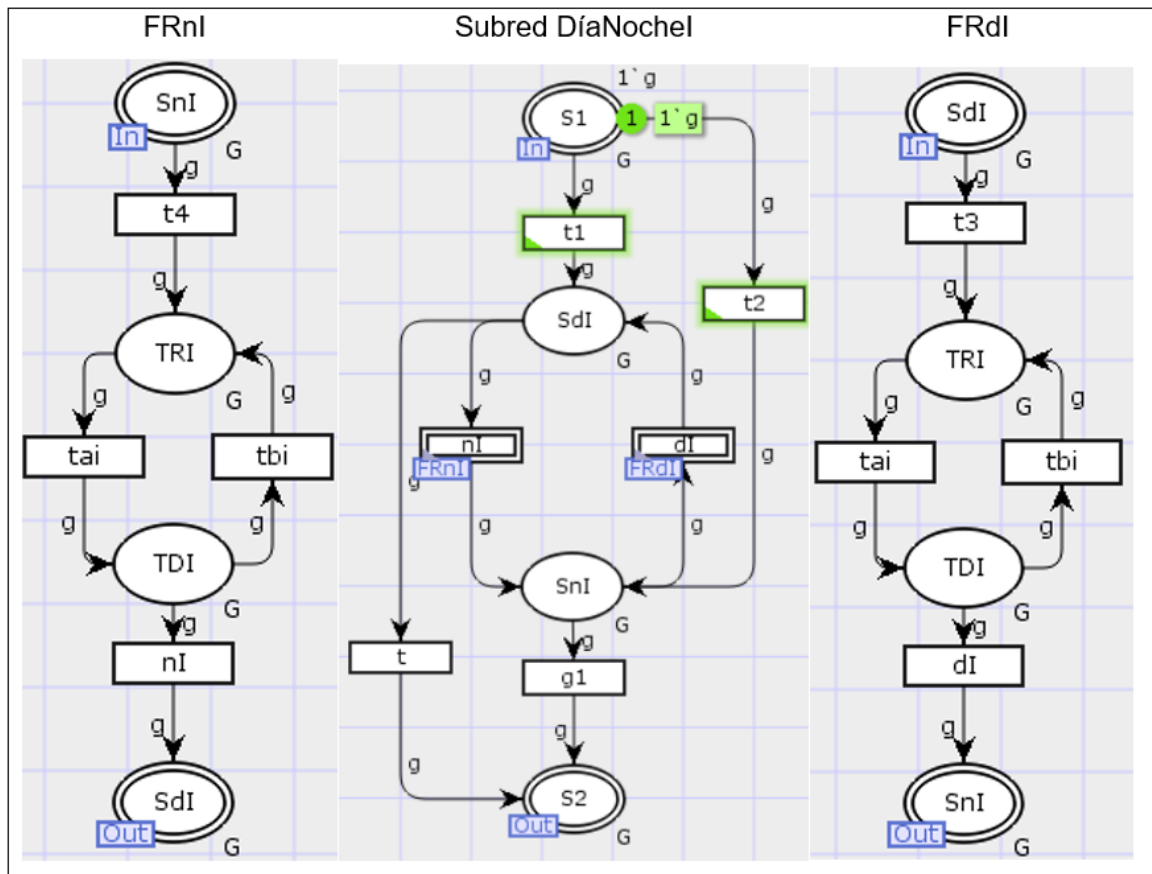
afectan el crecimiento de las plantas, y la automatización de subprocesos en la nutrición y el control climático. Igualmente, se nota mucho trayecto por recorrer en la fase investigativa, que permita masificar la técnica del cultivo. Aún existen muchas hipótesis para validar, relacionadas con las concentraciones óptimas de nutrientes en función del tipo de cultivo, la edad fenológica, el suministro de agua, el control de plagas, la trazabilidad del cultivo, la iluminación, y la alta dependencia energética, entre otras.

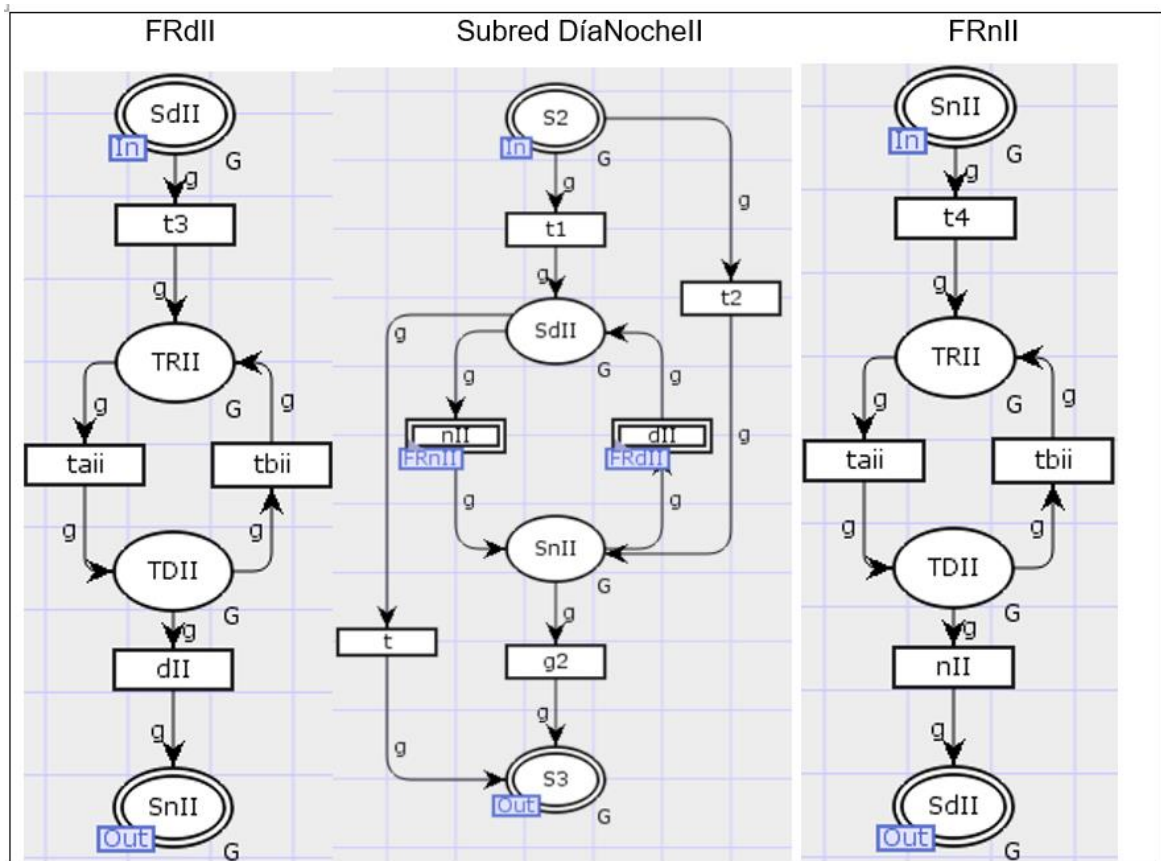
- Desarrollo de modelos de control y automatización de la dosificación nutritiva para la fase productiva, con normas basadas en modelos semánticos, como ISA S88 e ISA S95.
- Modelamiento de sistemas sin suelo (Aeroponía-planta-ambiente) a través de un enfoque holónico, que presenta características con funciones de planificación, programación, supervisión y control de un proceso productivo. Su implementación está basada en la programación de controladores lógicos bajo la norma IEC61499, orientada a la programación por objetos. Lo que puede permitir el estudio de las variables influyentes en un sistema de producción aeropónico, con el concepto de unidad inteligente distribuida, escalable mediante agregación y autosimilaridad.

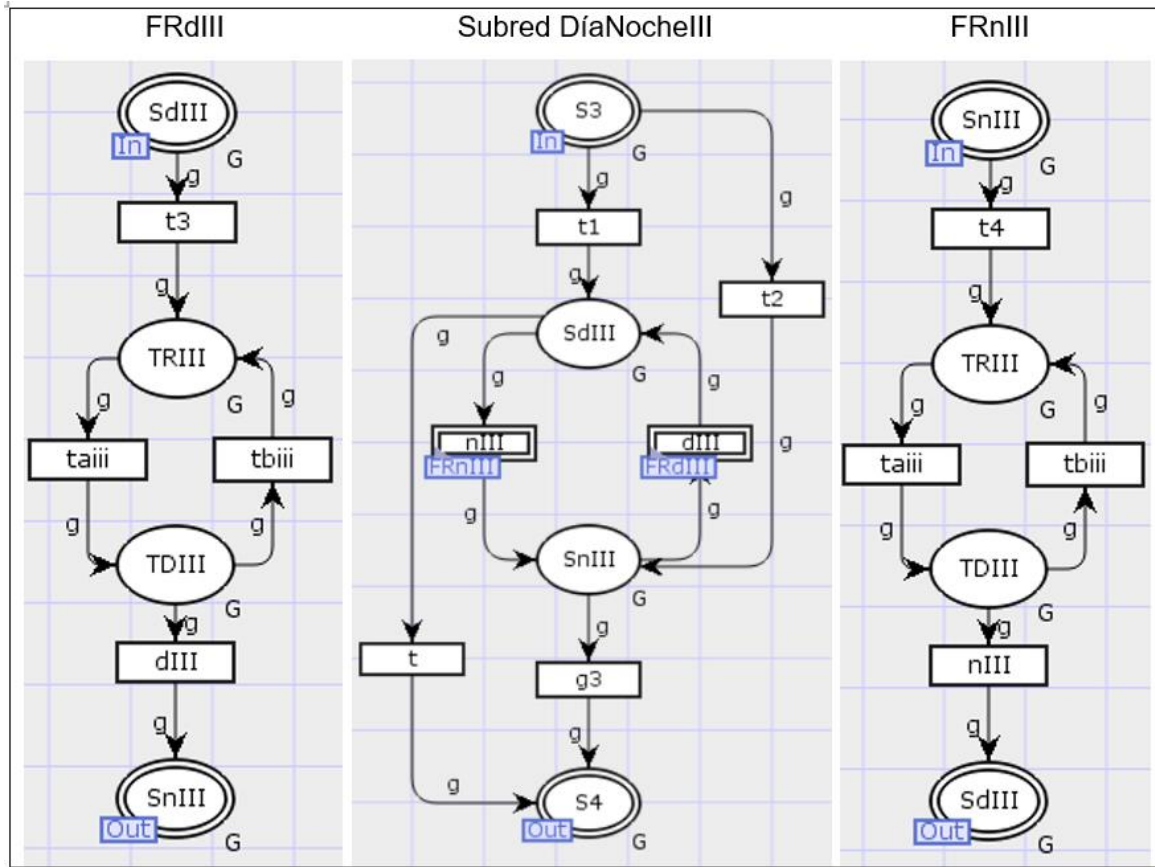
Anexo A: Modelo de red de Petri jerárquico (HPN)



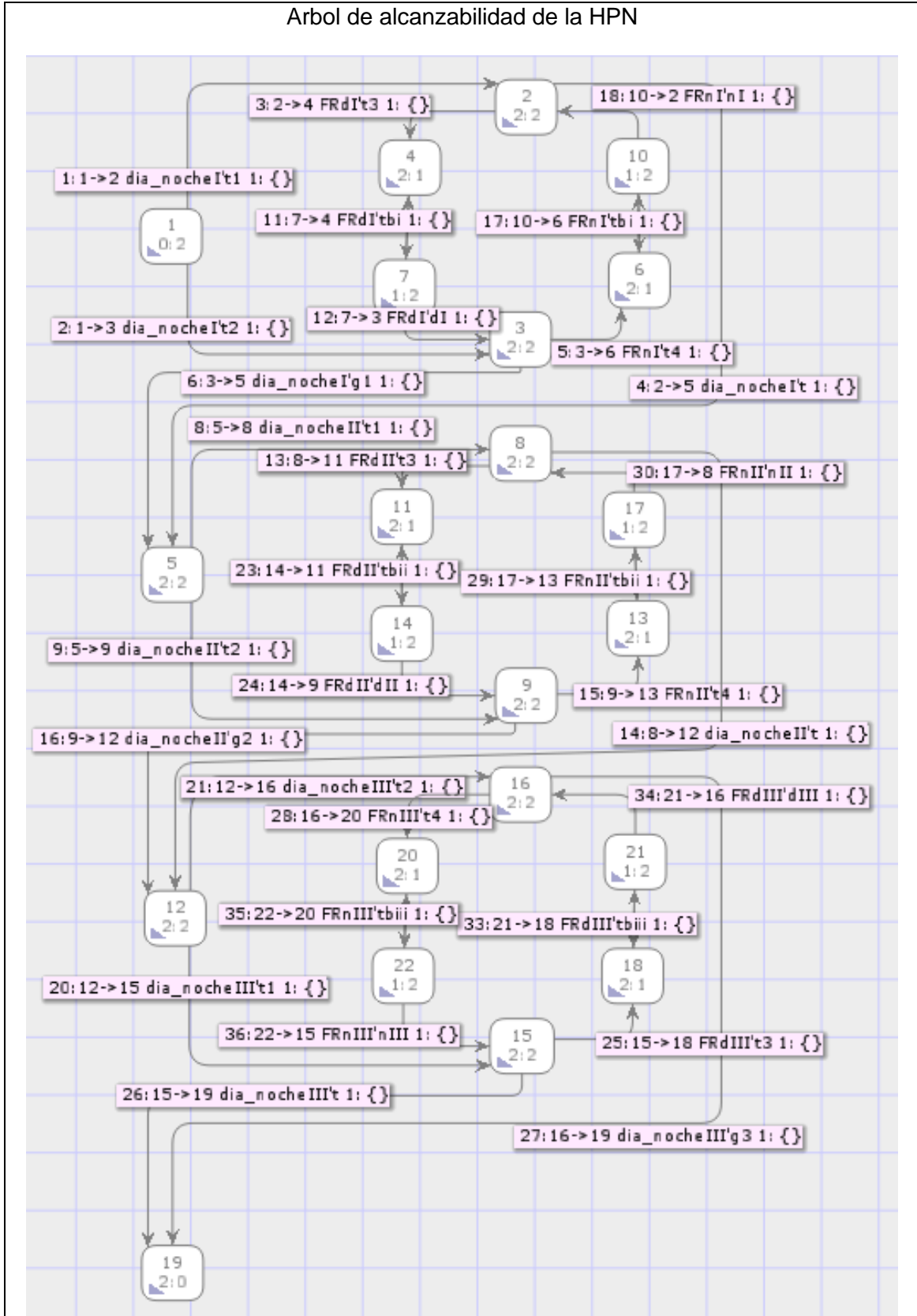
88 Modelo híbrido para la dosificación automática de nutrientes en un sistema aeropónico







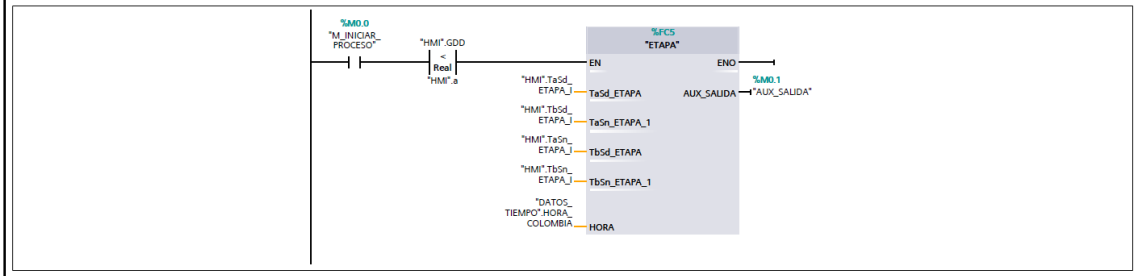
Arbol de alcanzabilidad de la HPN



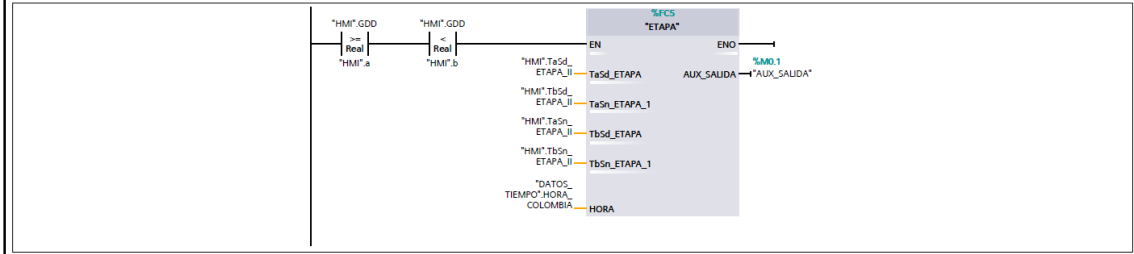
Anexo B: Programa en TIA portal para la representación del autómata frecuencia de dosificación nutricional.

Totally Integrated Automation Portal																																																																																								
<h3 style="margin: 0;">Bloques de programa</h3> <h4 style="margin: 0;">Main [OB1]</h4> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <thead> <tr> <th colspan="8" style="background-color: #e0e0e0;">Main Propiedades</th> </tr> <tr> <th colspan="8" style="background-color: #e0e0e0;">General</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 15%;">Nombre</td> <td style="width: 15%;">Main</td> <td style="width: 15%;">Número</td> <td style="width: 15%;">1</td> <td style="width: 15%;">Tipo</td> <td style="width: 15%;">OB</td> <td style="width: 15%;">Idioma</td> <td style="width: 15%;">KOP</td> </tr> <tr> <td>Numeración</td> <td>Automático</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <th colspan="8" style="background-color: #e0e0e0;">Información</th> </tr> <tr> <td>Título</td> <td>Frecuencia de dosificación Nutricional</td> <td>Autor</td> <td></td> <td>Comentario</td> <td></td> <td>Familia</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Versión</td> <td>0.1</td> <td>ID personalizada</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Nombre</th> <th style="width: 15%;">Tipo de datos</th> <th style="width: 15%;">Valor predet.</th> <th style="width: 15%;">Supervisión</th> <th style="width: 25%;">Comentario</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5" style="background-color: #e0e0e0;">▼ Input</td> </tr> <tr> <td>Initial_Call</td> <td>Bool</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Remanence</td> <td>Bool</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Temp</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constant</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin: 0;">Segmento 1: INICIO: Inicio del proceso desde el HMI</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> </div> <p style="margin: 0;">Segmento 2: LECTURA DE LA HORA</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> </div> <p style="margin: 0;">Segmento 3: LECTURA DE HORA</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> </div> <p style="margin: 0;">Segmento 4: MEDIDAS DE SENSORES</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> </div> <p style="margin: 0;">Segmento 5: GDD</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> </div> <p style="margin: 0;">Segmento 6: ETAPA I: (si GDD es menor que "a", se ejecuta la etapa1 (S1))</p>			Main Propiedades								General								Nombre	Main	Número	1	Tipo	OB	Idioma	KOP	Numeración	Automático							Información								Título	Frecuencia de dosificación Nutricional	Autor		Comentario		Familia		Versión	0.1	ID personalizada						Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario	▼ Input					Initial_Call	Bool				Remanence	Bool				Temp					Constant				
Main Propiedades																																																																																								
General																																																																																								
Nombre	Main	Número	1	Tipo	OB	Idioma	KOP																																																																																	
Numeración	Automático																																																																																							
Información																																																																																								
Título	Frecuencia de dosificación Nutricional	Autor		Comentario		Familia																																																																																		
Versión	0.1	ID personalizada																																																																																						
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario																																																																																				
▼ Input																																																																																								
Initial_Call	Bool																																																																																							
Remanence	Bool																																																																																							
Temp																																																																																								
Constant																																																																																								

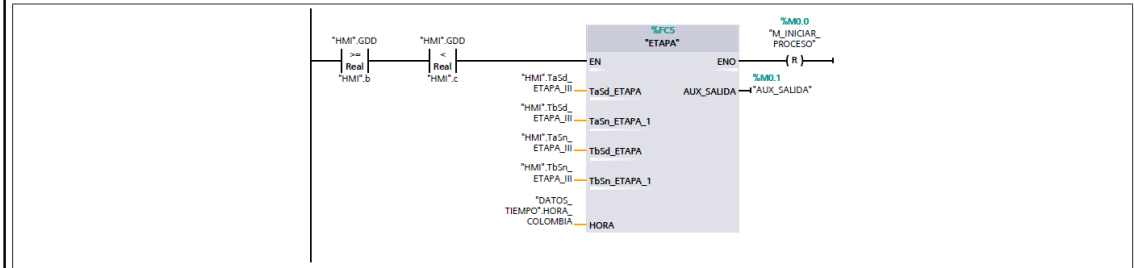
Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--



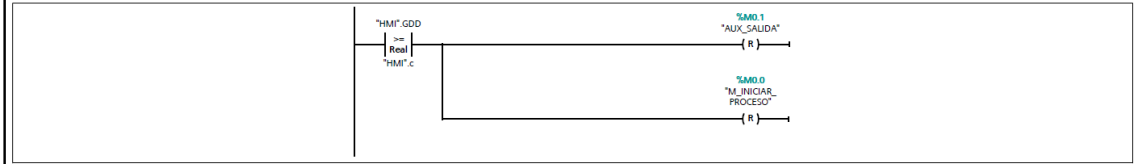
Segmento 7: ETAPA II: (Si GDD es mayor o igual que "a", se ejecuta la etapall (S2))



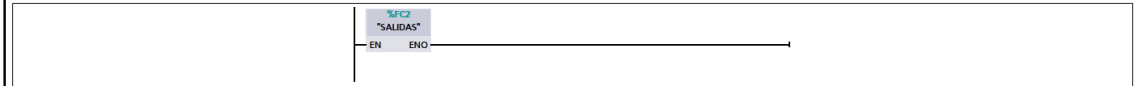
Segmento 8: ETAPA III: (Si GDD es mayor e igual que "b", se ejecuta la etapalll (S3))



Segmento 9: FINALIZACIÓN ETAPAS: (Si GDD es mayor e igua a "c", se apaga la salida y se pasa al estado S4)



Segmento 10: LLAMADO DE SALIDAS



--	--	--

Totally Integrated Automation Portal																																																																																																										
<h3>Bloques de programa</h3> <h4>DIA [FC3]</h4> <p>DIA Propiedades</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="background-color: #e0e0e0;">General</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 20%;">Nombre</td> <td style="width: 20%;">DIA</td> <td style="width: 20%;">Número</td> <td style="width: 40%;">3</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Tipo</td> <td>FC</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Idioma</td> <td>KOP</td> </tr> <tr> <th colspan="4" style="background-color: #e0e0e0;">Numeración</th> </tr> <tr> <td>Numeración</td> <td colspan="3">Automático</td> </tr> <tr> <th colspan="4" style="background-color: #e0e0e0;">Información</th> </tr> <tr> <td>Título</td> <td></td> <td>Autor</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Versión</td> <td>0.1</td> <td>ID personalizada</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Comentario</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Familia</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Nombre</th> <th style="width: 20%;">Tipo de datos</th> <th style="width: 20%;">Valor predet.</th> <th style="width: 20%;">Supervisión</th> <th style="width: 20%;">Comentario</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>▼ Input</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>HORA</td> <td>USInt</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TaSd</td> <td>Time</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TbSd</td> <td>Time</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>▼ Output</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AUX_SALIDA</td> <td>Bool</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>InOut</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Temp</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constant</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>▼ Return</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>DIA</td> <td>Void</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Segmento 1: HORAS DE DÍA: (Rango adecuado para que funcione acorde con la hora en Colombia 6am-6pm)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <pre> graph LR H1["#HORA 6"] --- AND1 H2["#HORA 18"] --- AND1 AND1 --- EN["EN"] EN --- MFC1["MFC1 OSCILADOR"] MFC1 -- "#TaSd → Tai" --- AND1 MFC1 -- "#TbSd → Tbi" --- AND1 MFC1 -- "AUX_salida → #AUX_SALIDA" --- OUT["#AUX_SALIDA"] </pre> </div>			General				Nombre	DIA	Número	3			Tipo	FC			Idioma	KOP	Numeración				Numeración	Automático			Información				Título		Autor		Versión	0.1	ID personalizada				Comentario				Familia		Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario	▼ Input					HORA	USInt				TaSd	Time				TbSd	Time				▼ Output					AUX_SALIDA	Bool				InOut					Temp					Constant					▼ Return					DIA	Void			
General																																																																																																										
Nombre	DIA	Número	3																																																																																																							
		Tipo	FC																																																																																																							
		Idioma	KOP																																																																																																							
Numeración																																																																																																										
Numeración	Automático																																																																																																									
Información																																																																																																										
Título		Autor																																																																																																								
Versión	0.1	ID personalizada																																																																																																								
		Comentario																																																																																																								
		Familia																																																																																																								
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario																																																																																																						
▼ Input																																																																																																										
HORA	USInt																																																																																																									
TaSd	Time																																																																																																									
TbSd	Time																																																																																																									
▼ Output																																																																																																										
AUX_SALIDA	Bool																																																																																																									
InOut																																																																																																										
Temp																																																																																																										
Constant																																																																																																										
▼ Return																																																																																																										
DIA	Void																																																																																																									

Totally Integrated Automation Portal		
<h2 style="margin: 0;">Bloques de programa</h2> <h3 style="margin: 0;">ETAPA [FC5]</h3>		
ETAPA Propiedades		
General		
Nombre	ETAPA	Número
Numeración	Automático	Tipo
		FC
		Idioma
		KOP
Información		
Título		Autor
Versión	0.1	ID personalizada
		Comentario
		Familia
Nombre		
		Tipo de datos
		Valor predet.
		Supervisión
		Comentario
Input		
TaSd_ETAPA		Time
TaSn_ETAPA_1		Time
TbSd_ETAPA		Time
TbSn_ETAPA_1		Time
HORA		USInt
Output		
AUX_SALIDA		Bool
InOut		
Temp		
AUX_SALIDA_DIA		Bool
AUX_SALIDA_NOCHE		Bool
Constant		
Return		
ETAPA		Void
<p>Segmento 1: DÍA: Subrutina día(si se debe ejecutar segun la hora se ponen los tiempos de esta etapa)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		
<p>Segmento 2: NOCHE: Subrutina Noche (si se debe ejecutar segun la hora se ponen los tiempos de esta etapa)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		
<p>Segmento 3: ACTIVACIÓN SALIDA: Activacion de la salida (ya sea en la noche o en el día)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		

Totally Integrated Automation Portal																																																																																														
<h3 style="margin: 0;">Bloques de programa</h3> <h4 style="margin: 0;">NOCHE [FC4]</h4> <div style="background-color: #e0e0e0; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">NOCHE Propiedades</div> <div style="background-color: #e0e0e0; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">General</div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <tr> <td style="width: 15%;">Nombre</td> <td style="width: 25%;">NOCHE</td> <td style="width: 15%;">Número</td> <td style="width: 15%;">4</td> <td style="width: 15%;">Tipo</td> <td style="width: 15%;">FC</td> <td style="width: 15%;">Idioma</td> <td style="width: 10%;">KOP</td> </tr> <tr> <td>Numeración</td> <td>Automático</td> <td colspan="6"></td> </tr> </table> <div style="background-color: #e0e0e0; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Información</div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <tr> <td style="width: 20%;">Título</td> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 20%;">Autor</td> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 20%;">Comentario</td> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 20%;">Familia</td> <td style="width: 20%;"></td> </tr> <tr> <td>Versión</td> <td>0.1</td> <td>ID personalizada</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <thead> <tr style="background-color: #e0e0e0;"> <th style="width: 25%;">Nombre</th> <th style="width: 15%;">Tipo de datos</th> <th style="width: 15%;">Valor predet.</th> <th style="width: 15%;">Supervisión</th> <th style="width: 30%;">Comentario</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5">▼ Input</td> </tr> <tr> <td>HORA</td> <td>USInt</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TaSn</td> <td>Time</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TbSn</td> <td>Time</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="5">▼ Output</td> </tr> <tr> <td>AUX_SALIDA</td> <td>Bool</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>InOut</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Temp</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constant</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="5">▼ Return</td> </tr> <tr> <td>NOCHE</td> <td>Void</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin: 5px 0;">Segmento 1: HORAS NOCHE: (Rango adecuado para que funcione acorde con la hora en Colombia 6pm-6am)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>			Nombre	NOCHE	Número	4	Tipo	FC	Idioma	KOP	Numeración	Automático							Título		Autor		Comentario		Familia		Versión	0.1	ID personalizada						Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario	▼ Input					HORA	USInt				TaSn	Time				TbSn	Time				▼ Output					AUX_SALIDA	Bool				InOut					Temp					Constant					▼ Return					NOCHE	Void			
Nombre	NOCHE	Número	4	Tipo	FC	Idioma	KOP																																																																																							
Numeración	Automático																																																																																													
Título		Autor		Comentario		Familia																																																																																								
Versión	0.1	ID personalizada																																																																																												
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario																																																																																										
▼ Input																																																																																														
HORA	USInt																																																																																													
TaSn	Time																																																																																													
TbSn	Time																																																																																													
▼ Output																																																																																														
AUX_SALIDA	Bool																																																																																													
InOut																																																																																														
Temp																																																																																														
Constant																																																																																														
▼ Return																																																																																														
NOCHE	Void																																																																																													

Totally Integrated Automation Portal		
<h2 style="margin: 0;">Bloques de programa</h2> <h3 style="margin: 0;">OSCILADOR [FC1]</h3>		
OSCILADOR Propiedades		
General		
Nombre	OSCILADOR	Número
Numeración	Automático	Tipo
		FC
		Idioma
		KOP
Información		
Título		Autor
Versión	0.1	ID personalizada
		Comentario
		Familia
Propiedades de datos		
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.
▼ Input		
Tai	Time	
Tbi	Time	
▼ Output		
AUX_salida	Bool	
InOut		
Temp		
Constant		
▼ Return		
OSCILADOR	Void	
<p>Segmento 1: TIEMPO ENCENDIDO (Tiempo de activacion de la salidad digital Ta)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		
<p>Segmento 2: SETEO AUXILIAR DE SALIDA: mientras transcurre el tiempo encendido</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		
<p>Segmento 3: TIEMPO APAGADO: (Activacion la salida digital Tb)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		
<p>Segmento 4: RESETEO AUXILIAR DE SALIDA: mientras transcurre el tiempo apagado</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div>		

Totally Integrated Automation Portal																																																																																										
<p>Bloques de programa</p> <p>SALIDAS [FC2]</p> <p>SALIDAS Propiedades</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <tr> <th colspan="8" style="background-color: #e0e0e0;">General</th> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Nombre</td> <td style="width: 15%;">SALIDAS</td> <td style="width: 10%;">Número</td> <td style="width: 10%;">2</td> <td style="width: 15%;">Tipo</td> <td style="width: 15%;">FC</td> <td style="width: 10%;">Idioma</td> <td style="width: 10%;">KOP</td> </tr> <tr> <td>Numeración</td> <td>Automático</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr> <th colspan="8" style="background-color: #e0e0e0;">Información</th> </tr> <tr> <td>Título</td> <td></td> <td>Autor</td> <td></td> <td>Comentario</td> <td></td> <td>Familia</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Versión</td> <td>0.1</td> <td>ID personalizada</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">Nombre</th> <th style="width: 15%;">Tipo de datos</th> <th style="width: 15%;">Valor predet.</th> <th style="width: 15%;">Supervisión</th> <th style="width: 30%;">Comentario</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Input</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Output</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>InOut</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Temp</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Constant</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>▼ Return</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>SALIDAS</td><td>Void</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Segmento 1: SALIDA OSCILANTE</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p>The diagram shows two signal paths connected by a horizontal line. On the left, there is a signal labeled "%M0.1 'AUX_SALIDA'". On the right, there is a signal labeled "%Q0.0 'SALIDA_OSCILADOR'". The connection is represented by a horizontal line with vertical bars at both ends, indicating a bidirectional or control signal link.</p> </div>			General								Nombre	SALIDAS	Número	2	Tipo	FC	Idioma	KOP	Numeración	Automático							Información								Título		Autor		Comentario		Familia		Versión	0.1	ID personalizada						Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario	Input					Output					InOut					Temp					Constant					▼ Return					SALIDAS	Void			
General																																																																																										
Nombre	SALIDAS	Número	2	Tipo	FC	Idioma	KOP																																																																																			
Numeración	Automático																																																																																									
Información																																																																																										
Título		Autor		Comentario		Familia																																																																																				
Versión	0.1	ID personalizada																																																																																								
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario																																																																																						
Input																																																																																										
Output																																																																																										
InOut																																																																																										
Temp																																																																																										
Constant																																																																																										
▼ Return																																																																																										
SALIDAS	Void																																																																																									

Totally Integrated Automation Portal											
<h3 style="margin: 0;">Bloques de programa</h3> <h4 style="margin: 0;">PT100 4-20 mA [FC8]</h4>											
PT100 4-20 mA Propiedades											
General											
Nombre	PT100 4-20 mA	Número	8	Tipo	FC	Idioma	KOP				
Numeración	Automático										
Información											
Título	Autor		Comentario		Familia						
Versión	0.1	ID personalizada									
Nombre			Tipo de datos		Valor predet.		Supervisión		Comentario		
▼ Input											
temperatura minima			Real								
temperatura maxima			Real								
temp_a_leer			Real								
▼ Output											
temperatura_medida			Real								
InOut											
▼ Temp											
aux_temp			Real								
Constant											
▼ Return											
PT100 4-20 mA			Void								
Segmento 1:											
Segmento 2:											

102 Modelo híbrido para la dosificación automática de nutrientes en un sistema aeropónico

Totally Integrated Automation Portal									
Bloques de programa									
DATOS_TIEMPO [DB1]									
DATOS_TIEMPO Propiedades									
General									
Nombre	DATOS_TIEMPO	Número	1	Tipo	DB				
Numeración	Automático								
Información									
Título		Autor		Comentario					
Versión	0.1	ID personalizada							
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
▼ TIEMPO	DTL	DTL#1970-01-01-00:00:00	False	True	True	True	False		
YEAR	UInt	1970	False	True	True	True	False		
MONTH	USInt	1	False	True	True	True	False		
DAY	USInt	1	False	True	True	True	False		
WEEKDAY	USInt	5	False	True	True	True	False		
HOUR	USInt	0	False	True	True	True	False		
MINUTE	USInt	0	False	True	True	True	False		
SECOND	USInt	0	False	True	True	True	False		
NANOSECOND	UDInt	0	False	True	True	True	False		
HORA_COLOMBIA	USInt	0	False	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal									
Bloques de programa									
HMI [DB5]									
HMI Propiedades									
General									
Nombre	HMI	Número	5	Tipo	DB	Idioma	DB		
Numeración	Automático								
Información									
Título		Autor		Comentario		Familia			
Versión	0.1	ID personalizada							
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
a	Real	2.0	False	True	True	True	False		
b	Real	3.0	False	True	True	True	False		
c	Real	4.0	False	True	True	True	False		
TaSd_ETAPA_I	Time	T#2s	False	True	True	True	False		
TbSd_ETAPA_I	Time	T#10s	False	True	True	True	False		
TaSn_ETAPA_I	Time	T#2s	False	True	True	True	False		
TbSn_ETAPA_I	Time	T#15s	False	True	True	True	False		
TaSd_ETAPA_II	Time	T#10s	False	True	True	True	False		
TbSd_ETAPA_II	Time	T#15s	False	True	True	True	False		
TaSn_ETAPA_II	Time	T#10s	False	True	True	True	False		
TbSn_ETAPA_II	Time	T#15s	False	True	True	True	False		
TaSd_ETAPA_III	Time	T#10s	False	True	True	True	False		
TbSd_ETAPA_III	Time	T#15s	False	True	True	True	False		
TaSn_ETAPA_III	Time	T#10s	False	True	True	True	False		
TbSn_ETAPA_III	Time	T#15s	False	True	True	True	False		
INICIAR_PROCESO	Bool	false	False	True	True	True	False		
GDD	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Tmax	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Tmin	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Tb	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Temp_ambiente	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Temp_raiz	Real	0.0	False	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal																																																																																										
<p>Bloques de programa</p> <p>TOMA_DE_MEDIDAS [FC6]</p> <p>TOMA_DE_MEDIDAS Propiedades</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #e0e0e0;"> <th colspan="8">General</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 15%;">Nombre</td> <td style="width: 15%;">TOMA_DE_MEDIDAS</td> <td style="width: 10%;">Número</td> <td style="width: 10%;">6</td> <td style="width: 10%;">Tipo</td> <td style="width: 10%;">FC</td> <td style="width: 10%;">Idioma</td> <td style="width: 10%;">KOP</td> </tr> <tr> <td>Numeración</td> <td>Automático</td> <td colspan="6"></td> </tr> <tr style="background-color: #e0e0e0;"> <th colspan="8">Información</th> </tr> <tr> <td>Título</td> <td></td> <td>Autor</td> <td></td> <td>Comentario</td> <td></td> <td>Familia</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Versión</td> <td>0.1</td> <td>ID personalizada</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr style="background-color: #e0e0e0;"> <th style="width: 25%;">Nombre</th> <th style="width: 15%;">Tipo de datos</th> <th style="width: 15%;">Valor predet.</th> <th style="width: 15%;">Supervisión</th> <th style="width: 30%;">Comentario</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Input</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Output</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>InOut</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Temp</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Constant</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Return</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>TOMA_DE_MEDIDAS</td><td>Void</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Segmento 1: LECTURA PT100: TEMPERATURA AMBIENTE</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-top: 5px;"> </div> <p>Segmento 2: LECTURA PT100: TEMPERATURA DE LA RAIZ</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-top: 5px;"> </div>			General								Nombre	TOMA_DE_MEDIDAS	Número	6	Tipo	FC	Idioma	KOP	Numeración	Automático							Información								Título		Autor		Comentario		Familia		Versión	0.1	ID personalizada						Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario	Input					Output					InOut					Temp					Constant					Return					TOMA_DE_MEDIDAS	Void			
General																																																																																										
Nombre	TOMA_DE_MEDIDAS	Número	6	Tipo	FC	Idioma	KOP																																																																																			
Numeración	Automático																																																																																									
Información																																																																																										
Título		Autor		Comentario		Familia																																																																																				
Versión	0.1	ID personalizada																																																																																								
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Supervisión	Comentario																																																																																						
Input																																																																																										
Output																																																																																										
InOut																																																																																										
Temp																																																																																										
Constant																																																																																										
Return																																																																																										
TOMA_DE_MEDIDAS	Void																																																																																									

Totally Integrated Automation Portal									
Bloques de programa / Bloques de sistema / Recursos de programa									
TRI_ENCENDIDO [DB2]									
TRI_ENCENDIDO Propiedades									
General									
Nombre	TRI_ENCENDIDO	Número	2	Tipo	DB	Idioma	DB		
Numeración	Automático								
Información									
Título		Autor	Simatic	Comentario		Familia	IEC		
Versión	1.0	ID personalizada	IEC_TMR						
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

Totally Integrated Automation Portal									
<p>Bloques de programa / Bloques de sistema / Recursos de programa</p> <p>TDI_APAGADO [DB3]</p>									
TDI_APAGADO Propiedades									
General									
Nombre	TDI_APAGADO	Número	3	Tipo	DB				
Numeración	Automático			Idioma	DB				
Información									
Título		Autor	Simatic	Comentario					
Versión	1.0	ID personalizada	IEC_TMR	Familia	IEC				
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

Bibliografía

- [1] S. Chandra *et al.*, “Assessment of Total Phenolic and Flavonoid Content, Antioxidant Properties, and Yield of Aeroponically and Conventionally Grown Leafy Vegetables and Fruit Crops: A Comparative Study,” *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014.
- [2] P. A. Putra and H. Yuliando, “Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review,” *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 3, pp. 283–288, 2015.
- [3] D. C. Chang, C. S. Park, S. Y. Kim, and Y. B. Lee, “Growth and tuberization of hydroponically grown potatoes,” *Potato Research*, vol. 55, no. 1, pp. 69–81, Mar. 2012.
- [4] K. Lakkireddy, K. Kasturi, and S. R. K.R.S, “Role of hydroponics and aeroponics in soilless culture in commercial food production,” *Research & Reviews: Journal of Agricultural Science & Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 26–35, 2012.
- [5] R. Stoner, “Progressive plant growing has business blooming,” in *Environmental and Agricultural Resources*, NASA Center for AeroSpace Information, 2006, pp. 64–67.
- [6] M. Chuecos and V. Mejía, “Sistema Aeropónico y sistema organopónico , para la Producción de semilla pre-básica de papa (*Solanum Tuberosum*) variedad papa blanca holandesa , en el municipio libertador EDO. Merida,” *Revista científica juvenil*, vol. 9, no. x, pp. 149–179, 2011.
- [7] S. Saquinga, “Producción de tubérculo semilla de papa (*solanum tuberosum*), categoría prebásica utilizando biol en un sistema aeropónico en el cantón

- mejía , provincia de pichincha,” Pregrado.tesis, fac. de ingeniería, Univ. Técnica de Ambato, Ecuador, 2012.
- [8] G. Ligia, “Evaluación técnica, económica y de sustentabilidad de dos métodos de producción de semilla pre básica de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo invernadero,” M.Sc.tesis, Dept. de agronomía, Univ. Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú, 2013.
- [9] J. R. Mateus *et al.*, “Technical and Economic Analysis of Aeroponics and other Systems for Potato Mini-Tuber Production in Latin America,” *American Journal of Potato Research*, vol. 90, no. 4, pp. 357–368, Aug. 2013.
- [10] R. Tierno, A. Carrasco, E. Ritter, and J. I. R. de Galarreta, “Differential Growth Response and Minituber Production of Three Potato Cultivars Under Aeroponics and Greenhouse Bed Culture,” *American Journal of Potato Research*, vol. 91, no. 4, pp. 346–353, 2014.
- [11] N. Srihajong, S. Ruamrungsri, P. Terdtoon, P. Kamonpet, and T. Ohyama, “Heat pipe as a cooling mechanism in an aeroponic system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 2–3, pp. 267–276, 2006.
- [12] H. A. Kratsch, W. R. Graves, and R. J. Gladon, “Aeroponic system for control of root-zone atmosphere,” *Environmental and Experimental Botany*, vol. 55, no. 1–2, pp. 70–76, Jan. 2006.
- [13] D. Gonyer, E. Ludovici, and L. Shaddak, “Investigation into Integrated Aeroponic Growth Systems,” Clarkson university, New York, 2010.
- [14] R. W. Langhans and T. W. Tibbitts, Eds., *Plant growth chamber handbook*. Iowa State University, 1997.
- [15] C. J. Hernandez and J. E. Piñeros, “Diseño de un prototipo sistema de producción tipo aeropónico,” Pregrado.tesis, fac. de ingeniería, Univ. EAN, Bogotá, Colombia, 2013.
- [16] A. Nelson, “Control Automatizado de cultivos Hidropónicos mediante Lógica Difusa,” Ph.D.tesis, Fac. de Ciencias Exactas , Univ. Nacional del centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina, 2015.

-
- [17] M. F. Saaid, A. Sanuddin, M. Ali, and M. Yassin, "Automated pH controller system for hydroponic cultivation," in *Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics*, 2015, pp. 186–190.
- [18] S. K. Partridge, "Automated pH monitoring system," B.S.thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Estados Unidos, 2013.
- [19] H. Flores-Magdaleno, H. Flores-Gallardo, and W. Ojeda-Bustamante, "Phenological prediction of potato crop by means of thermal time," *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 37, no. 2, pp. 149–157, 2014.
- [20] Á. Burgos, J. Argüello, J. Prause, and P. Cenóz, "Fenología de los estados vegetativos de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) en base al tiempo térmico," *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, vol. 45, no. 1, 2013.
- [21] B. M. Neto *et al.*, "Temperature effects on seed germination in races of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.)," *Acta Scientiarum. Agronomy*, vol. 28, no. 2, pp. 155–164, 2006.
- [22] C. A. Unigarro, L. N. Bermúdez, R. D. Medina, Á. Jaramillo, and C. P. Flórez, "Evaluation of four degree-day estimation methods in eight Colombian coffee-growing areas," *Agronomía Colombiana*, vol. 35, no. 3, pp. 374–381, 2017.
- [23] D. E. Cultivos and W. E. Rodr, "Comportamiento fenológico de tres variedades de rosas rojas en función de la acumulación de la temperatura," *Agronomía Colombiana*, vol. 24, no. 2, pp. 247–257, 2006.
- [24] H. Flores-gallardo, W. Ojeda-bustamante, H. Flores-magdaleno, and E. M. E. Sifuentes-ibarra, "Grados Día Y La Programación Integral Del Riego En El Cultivo De Papa," *Terra Latinoamericana*, vol. 30, no. 1, pp. 59–67, 2012.
- [25] S. O. Ortega-Farías, P. Lozano, Y. Moreno, and L. León, "Development of models for predicting phenology and evolution of maturity in cv. Cabernet Sauvignon and Chardonnay grapevines," *Agricultura Técnica*, vol. 62, no. 1, Jan. 2002.
- [26] D. H. García *et al.*, "Acumulación de Grados-Día en un Cultivo de Pepino (*Cucumis sativus* L .) en un Modelo de Producción Aeropónico," *Phenology, base temperature, physiological time, climate.*, vol. 65, no. 1, pp. 6389–6398,

- 2012.
- [27] V. H. Lallana and M. C. Lallana, *Manual de prácticas de fisiología vegetal Universidad Nacional de Entre Ríos*, 1a ed. paraná: Univ. Nacional de Entre Ríos, 2017.
- [28] M. Raviv, J. H. Lieth, and A. Bar-tal, "Growing plants in soilless culture: operational conclusions," in *Soilless Culture: Theory and Practice*, Third Edit., Elsevier B.V., 2007, pp. 545–571.
- [29] A. Mohammed and U. Furbach, "Using CLP to Model Hybrid Systems," *Computer Science Department, Koblenz-Landau University*, pp. 1–10, 2008.
- [30] L. Cristal, "Desarrollo de esquemas de control utilizando un enfoque híbrido con aplicación al convertidor multicelular de 3 niveles," M.Sc.tesis, fac. de ingeniería mecánica y eléctrica, Univ. Autónoma de nuevo león, monterrey, México, 2013.
- [31] H. Witsenhausen, "A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 11, no. 2, pp. 161–167, Apr. 1966.
- [32] F. Cellier, "Combined continuous/discrete system simulation by use of digital computers: techniques and tools," Ph.D.dissertation, Swiss federal institute Technology zurich, zurich, Suiza, 1979.
- [33] Y. Tian, "Modeling and control of equipment leasing system based on hybrid automaton," *Scientific research publishing*, vol. 07, no. 3, pp. 233–238, 2016.
- [34] T. a Henzinger, *Verification of Digital and Hybrid Systems*, vol. 170. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [35] B. Cruz, J. Contreras, R. Peon, and L. Perez, "Representación de un Sistema Fotovoltaico utilizando el Modelo del Autómata Híbrido," *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, vol. 1, no. 2, pp. 142–147, 2015.
- [36] B. . J. Cruz Jiménez, "Modelación y análisis de un sistema híbrido : Un caso de estudio con un sistema de tanques," *Revista Académica de la FI-UADY*, vol. 10, no. 2, p. 15, 2006.

-
- [37] T. A. Henzinger, "The Theory of Hybrid Automata," in *Verification of Digital and Hybrid Systems*, vol. 170, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, pp. 265–292.
- [38] C. W. Seibel, J. Farines, and J. E. R. Cury, "Towards Using Hybrid Automata for the Mission Planning of Unmanned Aerial Vehicles," in *Hybrid Systems V*, S. S. Antsaklis P., Lemmon M., Kohn W., Nerode A., Ed. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, pp. 324–340.
- [39] X. Li, O. Omotere, L. Qian, and E. R. Dougherty, "Review of stochastic hybrid systems with applications in biological systems modeling and analysis," *EURASIP Journal on Bioinformatics and Systems Biology*, vol. 2017, no. 1, p. 8, 2017.
- [40] A. Ozgun and M. Kirci, "Petri net models for agricultural management tasks," in *2015 Fourth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-geoinformatics)*, 2015, pp. 235–241.
- [41] O. García, G. Rodríguez, A. Encinas, A. Martin, and C. Rodriguez, "Aplicación de autómatas celulares para la descripción de extremos de la precipitación," *El Clima entre el Mar y la Montaña*, vol. 4, pp. 473–482, 2004.
- [42] S. A. Inca, "Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos," Pregado.tesis, fac. de ingeniería, Univ. ricardo palma, lima, peru, 2013.
- [43] O. Gutiérrez and M. Sanchez, "Automatización de un Sistema Invernadero con Hidroponia," Pregado.tesis, fac. de ingeniería, Univ. Nacional Autónoma de México, méxico, 2012.
- [44] I. Idris and M. I. Sani, "Monitoring and control of aeroponic growing system for potato production," in *IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics, ICCSII*, 2012, pp. 120–125.
- [45] M. Mehra, S. Saxena, S. Sankaranarayanan, R. J. Tom, and M. Veeramanikandan, "IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 155, no. October, pp. 473–486, 2018.
- [46] F. Francis, P. L. Vishnu, M. Jha, and B. Rajaram, "IOT-based automated

- aeroponics system,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 492, pp. 337–345, 2018.
- [47] J. G. Garcia Clua, “Sistemas de control híbrido. Aplicación a sistemas de generación de hidrógeno a partir de recursos energéticos renovables,” Ph.D.tesis, Dpto. de electronica, Univ. Nacional de La Plata, argentina, 2013.
- [48] C. Schwarz, “Modelling a Real-Time Control System using Parameterized Linear Hybrid Automata,” *Lecture Notes in Informatics*, p. 10, 2011.
- [49] O. Müller and T. Stauner, “Modelling and verification using linear hybrid automata--a case study,” *Mathematical and Computer Modelling of systems*, vol. 1, no. 1, pp. 1–19, 2000.
- [50] C. Jiménez, A. Viñas, and L. Caballero, “Diseño de un controlador basado en el modelo del autómatas híbrido.,” *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, vol. 13–2, pp. 5–12, 2009.
- [51] R. David and H. Alla, *Discrete, continuous, and hybrid Petri Nets*, vol. 08. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [52] K. Jensen and L. M. Kristensen, *Coloured Petri Nets*, vol. 12, no. 10. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [53] U. Furbach, J. Murray, F. Schmidsberger, and F. Stolzenburg, “Hybrid multiagent systems with timed Synchronization - Specification and Model Checking,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 4908 LNAI, pp. 205–220, 2008.
- [54] A. Mohammed and F. Stolzenburg, “Implementing hierarchical hybrid automata using constraint logic programming,” *Proceedings of 22nd Workshop on (Constraint) Logic Programming*, pp. 60–71, 2008.
- [55] A. Mohammed and C. Schwarz, “HieroMate: A graphical tool for specification and verification of hierarchical hybrid automata,” *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 695–702, 2009.
- [56] R. Florian, “Implementing Hierarchical Hybrid Automata into the Robot

- Operating System.” Hochschule Harz, 2010.
- [57] A. Mohammed, “HRCTL: A Specification Logic for Hierarchical Hybrid Automata,” *International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering (IJASCSE)*, vol. 2, no. 2, pp. 14–23, 2013.
- [58] H. C. Yen, “Introduction to Petri net theory,” in *Recent Advances in Formal Languages and Applications*, vol. 25, Z. Esik, C. Martín-Vide, and V. Mitran, Eds. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, pp. 343–373.
- [59] M. Silva, *Las redes de Petri: en la automática y la informática*, Ed. AC. madrid, españa, 1985.
- [60] A. David, “Hierarchical Modeling and Analysis of Timed Systems,” Ph.D.dissertation, Department of Information Technology, Uppsala University, Sweden, 2003.
- [61] T. A. Henzinger, P.-H. Ho, and H. Wong-Toi, “HYTECH: a model checker for hybrid systems,” *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, vol. 1, no. 1–2, pp. 110–122, Dec. 1997.
- [62] A. Mohammed and U. Furbach, “Using CLP to model hybrid systems,” *Computer Science Department*, p. 10, 2008.
- [63] L. P. Carloni, R. Passerone, A. Pinto, and A. L. Angiovanni-Vincentelli, “Languages and Tools for Hybrid Systems Design,” *Foundations and Trends in Electronic Design Automation*, vol. 1, no. 1/2, pp. 1–193, 2006.
- [64] D. Bera, K. van Hee, and H. Nijmeijer, “Modeling Hybrid Systems with Petri Nets,” *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 402, pp. 239–252, 2014.
- [65] M. Westergaard and L. M. Kristensen, “The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5606 LNCS, 2009, pp. 313–322.
- [66] U. Dhakal, V. M. Salokhe, H. J. Tantau, and J. Max, “Development of a Greenhouse Nutrient Recycling System for Tomato Production in Humid Tropics,” *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. VII,

- pp. 1–15, 2005.
- [67] A. J. Steidle Neto, S. Zolnier, and D. de Carvalho Lopes, “Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 103, pp. 17–25, Apr. 2014.
- [68] L. A. Peterson, N. T. Welander, and O. Hellgren, “An Intermittent Aeroponics System Adaptable to Root Research,” in *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, vol. 24, Elsevier, 1991, pp. 628–631.
- [69] A. Bot and J. Benites, “The importance of soil organic matter,” FAO Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Roma, Italia, Roma, Jan. 2005.
- [70] “Healthy soils are the basis for healthy food production | FAO,” Food and agriculture organization of the united nations, Roma, Italy, 2015.
- [71] “Microorganismos del suelo y biofertilización,” *Crops for Better Soil*. p. 43, 2014.
- [72] R. Baxter, N. Hastings, A. Law, and E. J. . Glass, “Manejo fitosanitario del cultivo de hortalizas,” *Animal Genetics*, vol. 39, no. 5, pp. 561–563, 2012.
- [73] J. Matinez, “Riego en hortalizas.” Facultad de Agronomía, UANL., p. 31, 2015.
- [74] E. H. Simonne, M. Dukes, and L. Zotarelli, “Principles and practices of irrigation management for vegetables,” in *Vegetable Production Handbook of Florida*, 2017th–2018th ed., 2018, pp. 11–18.
- [75] A. Hussain, K. Iqbal, S. Aziem, P. Mahato, and a K. Negi, “A review on the science of growing srops without soil (soilless culture) a novel alternative for growing crops,” *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, vol. 7, pp. 833–842, 2014.
- [76] Y. Rouphael and G. Colla, “The influence of drip irrigation or subirrigation on zucchini squash grown in closed-loop substrate culture with high and low nutrient solution concentrations,” *HortScience*, vol. 44, no. 2, pp. 306–311, 2009.

- [77] R. Achheim, B. De combaud, R. Fasel, and A. Muller, "Aeroponics apparatus and aeroponic cell," W.O. Patent Appl. 023948A1, Feb. 18, 2016.
- [78] B. Timothy A, "Aeroponic Growing System and Method," U. S. Patent Appl. 000162A1, Jan. 2, 2014.
- [79] D. Arias, "Producción de semilla prebásica en el sistema aeropónico en el Ecuador," Tesis Ing. Ag, Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador, 2009.
- [80] Y. A. Deaquiz, J. G. Álvarez-herrera, and L. P. Pinzón-gómez, "Efecto de diferentes láminas de riego sobre la producción y calidad de fresa (*Fragaria sp.*)," *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, vol. 8, no. 2, pp. 192–205, 2014.
- [81] J. Beltrano and D. O. Gimenez, *Cultivo en hidroponía*, 1ª Edición. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la universidad de la plata, 2015.
- [82] C. Marulanda and J. Izquierdo, *La Huerta Hidropónica Popular*, 3ª Edición. Santiago, Chile, 2003.
- [83] L. Trejo and F. C. Gomez, "Nutrient solutions for hydroponic systems," *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 135, no. 3, pp. 1833–1843, 2002.
- [84] D. R. Hoagland and D. I. Arnon, "The water culture method for growing plants without zoil," California Agricultural Experiment Station, Berkeley, 1950.
- [85] A. Silber and A. Bar-tal, "Nutrition of Substrate-Grown Plants," in *Soiless Culture*, M. R. and J. H. Lieth, Ed. Elsevier, 2008, pp. 291–339.
- [86] C. Sonneveld and W. Voogt, "Plant nutrition in future greenhouse production," in *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2009, pp. 393–403.
- [87] O. Tsoka, P. Demo, A. B. Nyende, and K. Ngamau, "Potato seed tuber production from in vitro and apical stem cutting under aeroponic system," *African Journal of Biotechnology*, vol. 11, no. 63, pp. 12612–12618, Aug. 2012.
- [88] J. Osvald, N. Petrovic, and J. Demsar, "Sugar and organic acid content of tomato fruits (*lycopersicon lycopersicum mill*) grown on aeroponics at different plant density," *Acta Alimentaria*, vol. 30, no. 1, pp. 53–61, Feb. 2001.

- [89] N. Kacjan-Maršić and J. Osvald, "Nitrate content in lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown on aeroponics with different quantities of nitrogen in the nutrient solution," *Acta Agronomica Hungarica*, vol. 50, no. 4, pp. 389–397, Dec. 2002.
- [90] H. peter Klaring, "Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops . A review," *Agronomie*, pp. 311–321, 2001.
- [91] M. Salazar-Gutierrez, J. Johnson, B. Chaves-Cordoba, and G. Hoogenboom, "Relationship of base temperature to development of winter wheat," *International Journal of Plant Production*, vol. 7, no. October, pp. 741–762, 2013.
- [92] F. Zalom, "Degree-days, the calculation and use of heat units in pest management," *Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. Resources Leaflet 21373*. Univ. of California, Berkeley, p. 10, 1983.
- [93] V. hugo Lallana and M. del carmen Lallana, "Manual de prácticas de fisiología vegetal Universidad Nacional de Entre Ríos," 2013.
- [94] G. D. Zapata, "Propuesta para la planificación , programación , supervisión y control de la producción en procesos continuos desde la teoría del control supervisorio y el enfoque holónico," Ph.D.tesis, fac. de ingeniería, Univ. de los andes, merida, venezuela, 2011.
- [95] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to discrete event systems*, Springer. 2th ed. New York, USA: Springer Science, 2008.
- [96] S. Paoletti, "Lecture notes of discrete event systems." Department of Information Engineering and Mathematical Sciences, University of Siena, Siena, Italia, p. 25, 2015.
- [97] M. Silva and C. Seatzu, *Control of Discrete-Event Systems*, vol. 433. London: Springer London, 2013.
- [98] B. Hrúz and M. C. Zhou, *Modeling and Control of Discrete event Dynamic Systems*. Nueva Jersey: Springer-Verlag London, 2007.
- [99] C. H. Qing, "Tree Petri Nets: Properties and Applications in Logical

- Problems,” in *Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*, 2010, vol. 3, pp. 295–298.
- [100] L. Popova-Zeugmann, *Time and Petri Nets*. Berlin, Germany: Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2013.
- [101] T. Murata, “Petri nets: Properties, analysis and applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.
- [102] S. Moral, *Teoría de Autómatas y Lenguajes Formales*. Granada, España: Dpto de ciencias de la computación e I.A. ETSI Informatica. Universidad de Granda, 2017.
- [103] J. Hopcroft, R. Motwani, and J. Ullman, *Teoría de autómatas, lenguajes y computación*, 3.^a ed. Madrid, España: Pearson Education, Inc, publishing as Addison-Wesley, 2007.
- [104] J. F. Raskin, “An introduction to hybrid automata,” *Handbook of networked and embedded control systems*, pp. 491–517, 2005.
- [105] A. Mohammed, “Hybrid Multi-agent Systems : Modeling , Specification and Verification,” Ph.D.thesis, Department of Computer Science, University of Koblenz-Landau, Germany, 2010.
- [106] J. Lorbeer and J. Padberg, “Hierarchical , Reconfigurable Petri Nets,” in *Petri Nets and Modeling*, I. Schaefer, C. Loek, and M. Felderer, Eds. Hamburg. Germany: Hamburg University of Applied Sciences, 2018, pp. 167–186.
- [107] K. H. John and M. Tiegelkamp, *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems*, 2nd Editio., vol. 53, no. 9. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [108] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing,” *R Foundation for Statistical Computing*, 2018.
- [109] F. de Mendiburu, *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*, R package. 2019.
- [110] J. Fox and S. Weisberg, *An {R} Companion to Applied Regression*, Second Edi. Thousand Oaks CA: Sage, 2011.