

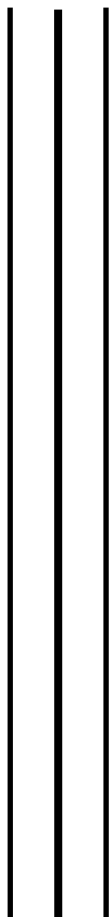


**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD  
LEÓN**



**TEMA:**

**VALIDACIÓN DEL MODELO DE  
INVERNADERO – CULTIVO G-SIM**

**MODALIDAD DE TITULACIÓN:**

**TESIS Y EXAMEN PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADO EN CIENCIAS AGROGENÓMICAS**

**P R E S E N T A:**

**HÉCTOR JOSUÉ DOMÍNGUEZ LÓPEZ**

**TUTOR:**

**Dr. AARÓN IVÁN VELÉZ RAMÍREZ**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos institucionales**

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de investigación Interdisciplinaria (LII) de la ENES Unidad León, UNAM. Agradezco el apoyo otorgado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) durante el proyecto IA207021 para la elaboración de esta tesis disponible en el acervo electrónico del PAPIIT.

## Agradecimientos personales

Quisiera reconocer y agradecer a mis amistades las cuales tuvieron un rol importante al darme un gran apoyo y soporte emocional durante todo este proceso de experimentación, escritura y vida escolar de tesista. Les agradezco por haber sido un factor importante que me permitió despejar mi mente e ideas en los días más pesados. Gracias, Moni, por ayudarme a solucionar ciertos problemas durante el proceso de limpieza de mis bases de datos y durante el proceso de programación, fue una observación pequeña, pero ayudó a que mi primera simulación de prueba fuera exitosa. Agradezco a Brenda Flores y Monse por platicar conmigo, salir a comer y en general por estar ahí cuando necesitaba ser escuchado y hablar de cualquier cosa random. Gracias, Paola, por haberme hecho reír con tus pláticas divertidas.

Agradezco a todas las personas que alguna vez fueron parte del equipo de laboratorio. Agradezco a Dany por hacer más divertido el tiempo que pasamos dentro del laboratorio; a Juan por escucharme atentamente y tratar de ayudarme en ciertos problemas o dudas que tuve a lo largo del tiempo; a Paul por apoyarme en cualquier cosa que necesitara y por estar siempre ahí de manera incondicional. También agradezco a Brenda Palafox por frecuentarme y hablar conmigo dentro y fuera de la escuela.

Agradezco a Alejandro, Fernando, Karla, Luis Ángel, Mich y Meli por haberme permitido conocerlos y convivir con ellos más cercanamente y que de algún modo me hicieron romper mi barrera de timidez dándome confianza de hablar con ellos a pesar de que no nos veíamos tan frecuentemente. También agradezco a Hugo por jugar videojuegos conmigo cuando estaba muy estresado, por salir y hablar conmigo.

Agradezco al Dr. Aarón Vélez por tenerme paciencia durante toda mi estancia en su equipo de laboratorio y por ayudarme a resolver mis dudas o problemas que de repente me surgían. Gracias a él aprendí cosas muy nuevas y diferentes debido al trabajo de tesis y otras actividades pequeñas que se realizaron a lo largo del tiempo.

Finalmente quiero agradecer a mis profesores de carrera a la Dra. Harumi por su calidez y apoyo durante toda la carrera, a la Dra. Rougon, al Dr. Yebra y al Dr. Amezcua por apoyarme durante el desarrollo de mi tesis, por tenerme paciencia y por compartir sus aprendizajes a lo largo de la carrera. Agradezco al Dr. Toño y al Dr. Omar ya que aprendí mucho en sus materias sobre genómica y además por lo que aprendí durante sus prácticas de campo. Agradezco a la Dra. Kalpana por sus clases tan interesantes y divertidas y por confiar en mí y reconocer mi esfuerzo en sus clases. Agradezco a la Dra. Ilane por su calidez, hospitalidad y amabilidad durante las convivencias que tuvimos a lo largo de la carrera y porque gracias a ella adopté a uno de mis perritos. Agradezco al Dr. Julio Vega y a la Dra. Cinthia por el breve periodo que estuve haciendo servicio en su equipo de laboratorio. Agradezco al Dr. Fernando por ayudarme en algunos experimentos de divulgación y

finalmente, agradezco a la maestra Angelina porque siempre nos enseñó el lado más “agro” de la carrera organizando seminarios y prácticas de campo muy interesantes.

En cuanto a mi familia, quisiera agradecer mucho a mi tía Lourdes (Titis) quien siempre me animó, estuvo pendiente de que comiera bien y me ayudó con algunas actividades del hogar en momentos donde más tenía mucho estrés. A mi hermana porque alguna vez fue a verme durante los talleres de divulgación.

## **Dedicatoria**

*A mi tío Fer, quien hace poco decidió partir de este mundo, pero que siempre me acompañó desde mi niñez hasta mi adultez; y a pesar de que no pudo ver el resultado de mi trabajo, fue parte del proceso.*

# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>9</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>10</b>
<i>Invernadero.....</i>	<i>10</i>
Temperatura.....	10
Humedad.....	11
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	11
Ventilación.....	11
<i>Sistemas EDO .....</i>	<i>11</i>
<i>Calibración (Parametrización) .....</i>	<i>12</i>
<i>Validación .....</i>	<i>12</i>
<i>Funcionamiento de G-Sim .....</i>	<i>13</i>
Modelo de invernadero .....	13
Modelo de cultivo .....	14
Interfaz de usuario .....	14
<i>Programación gráfica en LabVIEW™ .....</i>	<i>14</i>
<i>Formato TDMS .....</i>	<i>14</i>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>16</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>16</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>17</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>18</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>18</b>
<i>Objetivo general.....</i>	<i>18</i>
<i>Objetivos particulares .....</i>	<i>18</i>
<b>Metodología .....</b>	<b>19</b>
<i>Programación del sistema de almacenamiento de datos en formato TDMS.....</i>	<i>19</i>
<i>Automatización de la entrada de datos en el simulador de invernaderos (G-Sim).....</i>	<i>19</i>

<i>Simulación de invernaderos del Autonomous Greenhouse Challenge en G-Sim</i> .....	19
<i>Programación del sistema de calibración del simulador de invernaderos (G-Sim)</i> .....	22
<b>Resultados</b> .....	<b>29</b>
<i>El sistema de almacenamiento de datos en formato TDMS funciona para guardar los valores de la simulación</i> .....	29
<i>El simulador de invernaderos (G-Sim) funciona de manera semiautomática</i> .....	37
<i>Los resultados del simulador de invernaderos (G-Sim) muestran un valor de discrepancia cercano al cero</i> .....	43
<i>Los resultados del simulador de invernaderos (G-Sim) muestran un rendimiento bajo</i> .....	44
<b>Discusión</b> .....	<b>52</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>55</b>
<b>Perspectivas</b> .....	<b>56</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>57</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>60</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores de constantes de invernadero utilizados para las simulaciones realizadas en G-Sim .....	21
--	----



## Índice de figuras

Figura 1. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (1 de 6) .....	23
Figura 2. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (2 de 6) .....	24
Figura 3. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (3 de 6) .....	25
Figura 4. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (4 de 6) .....	26
Figura 5. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (5 de 6) .....	27
Figura 6. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (6 de 6) .....	28
Figura 7. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (1 de 5) .....	30
Figura 8. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (2 de 5) .....	31
Figura 9. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (3 de 5) .....	32
Figura 10. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (4 de 5) .....	33
Figura 11. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (5 de 5) .....	34
Figura 12. Contenido de un archivo TDMS proveniente de una simulación visto mediante Excel®	35
Figura 13. Pestaña Modeling .....	36
Figura 14. VI programado en LabVIEW2018™ para el cambio automático de las constantes físicas, de invernadero y de cultivo .....	38
Figura 15. Pestaña Settings .....	39
Figura 16. VI programado en LabVIEW2018™ para la interpretación de las bases de datos provenientes del Autonomous Greenhouse Challenge al simulador de invernaderos G-Sim.....	39
Figura 17. VI programado en LabVIEW2018™ para implementar las bases de datos del Autonomous Greenhouse Challenge .....	40
Figura 18. VI programado en LabVIEW2018™ para modificar la base de datos climática .....	40
Figura 19. Pestaña Settings .....	41
Figura 20. Nueva interfaz de usuario G-Sim .....	42
Figura 21. Gráficas de discrepancia de la temperatura del aire (Tair).....	45
Figura 22. Gráficas de discrepancia del porcentaje de humedad relativa en el aire (RHair) .....	46
Figura 23. Gráficas de discrepancia de las partes por millón (ppm) de CO <sub>2</sub> en el aire (CO <sub>2</sub> air)....	47
Figura 24. Gráficas de discrepancia de la temperatura de las tuberías (TPipe) .....	48
Figura 25. Gráficas de discrepancia del Control de Ventilación del Techo (Roof Ventilation Control) .....	49
Figura 26. Gráficas de comparación del rendimiento simulado y real .....	50

## Resumen

G-Sim es un modelo de invernadero – cultivo desarrollado en LabVIEW2018™ (Pérez Guerrero, 2021), capaz de simular el clima dentro del invernadero utilizando los datos climáticos de la región de interés, las características estructurales del invernadero a simular y los mecanismos de manejo del clima con los que cuenta. G-Sim es un modelo que aún requiere de un proceso de calibración y validación. Para el proceso de validación es necesario conocer qué tanto difieren los resultados simulados contra los resultados reales. Durante este trabajo se programó mediante el uso de la programación gráfica de LabVIEW2018™ un programa con estructura productor y consumidor que consiste en el guardado de datos a alta velocidad utilizando archivos de tipo TDMS. Dicho programa se utilizó para realizar el guardado de cinco simulaciones para la validación del modelo a través de los parámetros de temperaturas, humedad, concentración de CO<sub>2</sub> y ventilación. En cada experimento de validación se compara mediante una discrepancia qué tanto difieren los datos simulados por G-Sim de datos de invernadero reales. Estos datos reales son provenientes de cinco experimentos de cultivo de pepino en invernadero llevado a cabo en el 2018 durante el *Autonomous Greenhouse Challenge* (Hemming et al., 2019). Asimismo, se programaron funciones adicionales en la interfaz gráfica y funcionamiento de G-Sim que permitieron una mejor eficiencia al realizar cada simulación como lo fue el reordenamiento de la interfaz gráfica y un sistema semiautomático que carga constantes previas a la simulación. El periodo de simulación fue del 14 de agosto del 2018 a las 12h al 7 de diciembre del 2018 a la 1h utilizando alrededor de 430 mil valores por simulación, sin contemplar los datos ambientales. Actualmente, las simulaciones con las que se trabajaron en este proyecto generaron alrededor de 4.89 millones de datos con los cuales se calcularon las discrepancias del proyecto. En este análisis se observa que las simulaciones del modelo de invernadero – cultivo (G-Sim) resultan en una discrepancia cercana al cero. Sin embargo, la discrepancia obtenida para las temperaturas de la tubería, los datos se encuentran más desalineados. El principal factor que potencialmente afecta la simulación de la temperatura de las tuberías es el desconocimiento del algoritmo de control en el invernadero real. En G-SIM, se usan algoritmos PID para controlar la temperatura de la tubería en respuesta al control deseado de la temperatura del aire. Las ganancias del algoritmo PID necesitan calibración para simular mejor a esta variable.

## **Introducción**

En este documento se presenta detalladamente el proceso de validación del modelo invernadero – cultivo G-Sim. Durante este proyecto se trabajó programando nuevas funciones para G-Sim que permitieran realizar la validación de este modelo. Por consecuente, se programó un sistema de guardado de datos, una reorganización a la interfaz de usuario, para finalmente realizar la validación del modelo. En este último proceso se calculó la discrepancia comparando las simulaciones hechas por G-Sim contra resultados reales en la producción de pepino en un invernadero. Para este proceso se utilizaron bases de datos generadas durante el Autonomous Greenhouse Challenge (Hemming et al., 2019).

## **Invernadero**

El invernadero es uno de los principales métodos desarrollados en el campo de la agricultura protegida. A grandes rasgos, un invernadero es una estructura que utiliza materiales translúcidos para cubrir cierto cultivo de interés. Lo anterior ocasiona la creación de un microclima alrededor de las plantas. En el invernadero siempre se busca que el microclima sea lo más ideal posible para las plantas, ya que eso ayudará para mejorar el desarrollo y rendimiento del cultivo de interés (Nagarajan et al., 2002; Reddy, 2016).

El funcionamiento óptimo de un invernadero depende principalmente de tres cosas. Una de ellas es el microclima, el cual será acorde a la localización del invernadero y se adaptará a las necesidades del cultivo objetivo. El microclima incluye el control de ciertos factores como la humedad, la temperatura, el dióxido de carbono, el agua y la intensidad de la luz. Otro aspecto importante para el correcto funcionamiento de un invernadero es el diseño de la estructura, el cual dependerá de la forma física que tiene la estructura del invernadero, el material de sus cubiertas y la orientación de la construcción. Finalmente, otro de los aspectos para el correcto funcionamiento del invernadero es el manejo que incluye las redes de sensores y el control que se refiere a la toma de decisiones para enfrentar situaciones que pudieran afectar al desarrollo del cultivo. Esta toma de decisiones puede ser llevada a cabo por humanos o por inteligencia artificial (Badji et al., 2022).

## **Temperatura**

En un sistema de cultivo la temperatura puede afectar todos los estados de desarrollo de la planta como lo es la germinación, el crecimiento vegetativo, el desarrollo de las estructuras florales, la caída de las hojas y maduración de los frutos. En un sistema de cultivo de pepino las temperaturas óptimas

varían acorde a la edad del cultivo. Para la germinación se requiere que la temperatura del cultivo se encuentre entre los 11 y 15°C, mientras que para los primeros meses las temperaturas ideales van de los 19 a los 21°C y finalmente el periodo restante debería tener una temperatura de entre 17 y 19°C (Domis et al., 2001; Manrique, 1993; Rabbi et al., 2019; Van Der Vlugt, 1983a, 1983b).

### **Humedad**

La humedad de un invernadero debe ser monitoreada debido a que influye en el sistema hídrico de las plantas y en procesos que involucren la transpiración. Por lo que un mal control de esta podría ocasionar problemas relacionados con el movimiento de las estomas, afectando negativamente el crecimiento de las plantas, la calidad de los frutos, la fotosíntesis, la transpiración y tolerancia a la desecación. Debido a que la humedad afecta la transpiración de las plantas, un mal manejo de esta puede causar deshidratación, marchitamiento y necrosis. Además, un control inadecuado de la humedad puede favorecer en el desarrollo de plagas e infecciones en el cultivo (Albajes et al., 1999; Domis et al., 2001; Gruda, 2005; K.N. Tiwari et al., 2017; Rabbi et al., 2019).

### **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El dióxido de carbono está relacionado con el rendimiento y crecimiento del cultivo. En general, se ha observado que un enriquecimiento de CO<sub>2</sub> que va desde los 600 a 790 mg de CO<sub>2</sub>/kg puede generar una producción de biomasa mejor o similar que cultivos enriquecidos con 1,000 mg o más de CO<sub>2</sub>/kg (Heji & Van Uffelen, 1984; Manrique, 1993; Peet & Willits, 1987).

### **Ventilación**

El sistema de ventilación natural en un invernadero suele ser de tipo pasivo, es decir, que no depende de la electricidad, sino de factores ambientales como la velocidad del viento y gradientes térmicos que remplazarán el aire. Esto se logra mediante las estructuras del invernadero, donde un techo con ventanas laterales tiene la función de remplazar el aire caliente dentro del invernadero por aire frío que proviene del ambiente exterior (Rabbi et al., 2019).

### **Sistemas EDO**

Las ecuaciones diferenciales son herramientas matemáticas utilizadas para representar modelos en el área de las ciencias e ingenierías. Estas ecuaciones buscan interpretar fenómenos físicos mediante matemáticas. En este caso en particular, las ecuaciones tratan de explicar los procesos de crecimiento y desarrollo de cultivo. Generalmente las ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden se muestran de la forma:

$$y'(x) = f(x, y(x))$$

Siendo  $y(x)$  la función a encontrar. Mientras que  $f(x, y)$  es la ecuación diferencial basada en una función de dos variables (Atkinson et al., 2009; Butcher, 2008; Makowski et al., 2006):

$$y' = \frac{dy}{dx}$$

Las ecuaciones diferenciales pueden clasificarse de dos maneras que dependen del número de variables que involucran. Estos dos grupos son las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) y las ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) son aquellas que únicamente dependen de una variable independiente, es decir la ecuación diferencial podría tener una o más derivadas respecto a una variable específica. Mientras que, las ecuaciones diferenciales parciales dependen de una variable dependiente y dos o más variables independientes (Ince, 1956; Roberts, 2010).

### **Calibración (Parametrización)**

Los modelos de cultivo se construyen a partir de ecuaciones que tratan de explicar ciertos procesos o fenómenos que ocurren durante el desarrollo del cultivo. Estos modelos tienen parámetros, los cuales son valores que no son entradas u observaciones. Estos valores no son calculados por el modelo mismo. La parametrización busca estimar los valores de los parámetros del modelo dada una muestra de datos. Este proceso permite que los resultados del modelo se estimen de manera adecuada a los datos reales (Ahmed et al., 2020; Makowski et al., 2006).

El proceso de parametrización puede ser con un enfoque frecuentista o uno bayesiano. En el primero, los valores de los parámetros son fijos y no aleatorios. En este enfoque algunas técnicas conocidas son la máxima verosimilitud y mínimos cuadrados. Por otra parte, el enfoque bayesiano utiliza una muestra de datos al igual que el frecuentista, pero la diferencia es que se toma en cuenta los valores previos de los parámetros (Makowski et al., 2006).

### **Validación**

Definir la validez de un modelo es un proceso bastante subjetivo. Esto se debe a que cada desarrollador del modelo establece su propia definición de "validez". Para algunos investigadores, un modelo válido es aquel que representa completa y correctamente el fenómeno que se está modelando. Mientras que para otros investigadores la validez del modelo se alcanza cuando el modelo es lo suficientemente bueno (no perfecto) como para representar la realidad (Hills, 2006).

Asimismo, para llegar a la validación del modelo se debe pasar primero por la interpolación del modelo. Este proceso se cumple cuando se utiliza el modelo dentro del rango de condiciones para las cuales se creó. Es decir, el modelo se pone a prueba en entornos familiares o similares a los que se usaron para su desarrollo (Hills, 2006).

En contraste, la extrapolación es el proceso donde se pone a prueba el modelo. Este proceso se logra cuando se somete el modelo en un rango de condiciones distintas a las que se utilizaron durante su creación. En este proceso el modelo trabaja fuera de una zona de confort ya que se encuentra con condiciones menos cotidianas y más desconocidas. Es durante este ejercicio donde se evalúa la validez del modelo (Hills, 2006).

## **Funcionamiento de G-Sim**

G-Sim es un modelo de invernadero – cultivo desarrollado en LabVIEW2018™ (Pérez Guerrero, 2021), que es capaz de simular el clima dentro del invernadero utilizando los datos climáticos de la región de interés, las características estructurales del invernadero a simular y los mecanismos de manejo del clima con los que cuenta. G-Sim utiliza el método Runge-Kutta-Fehlberg (RK45) para dar solución numérica, o bien, aproximar la solución de las ecuaciones diferenciales utilizadas para cada variable de estado en conjunto con un modelo de invernadero. G-Sim toma como base el modelo propuesto por Vanthoor et al. 2011 e incorpora un modelo de cultivo de pepino; G-Sim fue desarrollado por Pérez Guerrero (2021). Debido a lo anterior, la funcionalidad de G-Sim se puede dividir en tres grandes partes; el modelo de invernadero, el modelo de cultivo y la interfaz de usuario. A continuación, se detalla cada una de estas tres partes.

### **Modelo de invernadero**

El modelo de invernadero de G-Sim tiene como sustento el modelo propuesto por Vanthoor et al. (2011). En G-Sim, el modelo de invernadero se compone de tres grupos de variables de estado. En el primer grupo de variables de estado se agrupan las variables de temperatura, en el segundo grupo las variables de presión de vapor y en el tercer grupo las variables referentes a la concentración de CO<sub>2</sub>(Pérez Guerrero, 2021).

Cada variable de estado es descrita por una ecuación diferencial. Estas ecuaciones diferenciales se resuelven numéricamente utilizando el solucionador de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE Solver) provisto por LabVIEW. El ODE Solver utilizado para G-Sim funciona con el método Runge-Kutta 45 (RK45)(Pérez Guerrero, 2021).

### **Modelo de cultivo**

El modelo de cultivo de G-Sim surgió a partir de diversas modificaciones y actualizaciones al modelo para el cultivo de pepino desarrollado por Marcelis (1994). Este modelo se divide en nueve submodelos de programación que se rigen mediante la resolución de una ecuación diferencial de la concentración interna de CO<sub>2</sub>; el submodelo fotosintético, el submodelo de respiración, el submodelo de balance de carbono, el submodelo de fraccionamiento de asimilados, el submodelo de crecimiento de partes vegetativas, el submodelo para peso seco y fresco, el submodelo de aborto de frutos, el submodelo de floración y el submodelo de cosecha (Pérez Guerrero, 2021).

### **Interfaz de usuario**

La interfaz de usuario (UI) de G-Sim trabaja con la arquitectura del productor y consumidor. La arquitectura de productor/consumidor permite un adecuado intercambio de información entre ciclos que corren a distintas velocidades. Este tipo de arquitectura tiene ciclos que producen datos y ciclos que consumen los datos producidos. Tomando en cuenta lo anterior, en la interfaz de usuario de G-Sim se utilizan tres grandes ciclos: el ciclo de eventos, que emite mensajes cuando el usuario presiona un botón de la interfaz gráfica; el ciclo de la interfaz gráfica, que consume los mensajes producidos para ejecutar la orden correspondiente en la interfaz del usuario; y el ciclo de simulación, que ejecuta todo el modelo, tanto de invernadero como el de cultivo (National Instruments, 2022a; Pérez Guerrero, 2021).

### **Programación gráfica en LabVIEW™**

El modelo de G-Sim se ha desarrollado en un entorno de programación gráfica llamado LabVIEW™ 2018 que consiste en clic y arrastre. De manera general, los archivos programados en LabVIEW reciben el nombre de VI y suele estar compuesto por una interfaz de usuario, un diagrama de bloques y el código gráfico. LabVIEW™ utiliza un lenguaje llamado G o diagrama de bloques, el cual es similar a un diagrama de flujo. Programar en G consiste en arrastrar y conectar nodos para que reciban un flujo de datos. Los programas creados con este tipo de lenguaje solo se ejecutan cuando el nodo recibe datos en todas sus entradas mediante conexiones llamadas “wires” (cables). El flujo de datos entre cables y nodos determinará el orden de la ejecución. Por ello, al programar en LabVIEW™ es importante cuidar el orden y la limpieza gráfica (National Instruments, 2023b).

### **Formato TDMS**

El sistema de administración de datos técnicos, o TDMS por sus siglas en inglés, es un formato de archivos que tiene características las cuales le permite la organización de datos por medio de tres

de jerarquías. En el primer nivel de la jerarquía se encuentra el título o autor del archivo, en el segundo nivel se encuentran los grupos y en el último nivel los canales, los cuales son datos sin procesar. Este formato de archivo se utiliza para casos donde se requiere una escritura y lectura de datos a una velocidad muy alta, pero sin perder el orden o jerarquía, como lo son las mediciones, simulaciones y análisis en masa. Esto se traduce en la generación de un archivo liviano y fácil de abrir que contiene una gran cantidad de información ordenada (National Instruments, 2022b, 2023c).



## Antecedentes

En el año 2018, la Universidad de Wageningen organizó el *Autonomous Greenhouse Challenge*. Esta competencia de carácter internacional consistió en reunir a expertos en las áreas de tecnología de invernaderos, inteligencia artificial y horticultura con el objetivo de desarrollar algoritmos basados en inteligencia artificial con la capacidad de controlar remota y autónomamente la producción de pepino en invernadero, generando la mayor producción posible con el menor gasto de recursos. Lo anterior a través del control del ambiente del invernadero. Para esta competencia, la producción de pepino se realizó en invernaderos ubicados en Bleiswijk, Países Bajos. En este ejercicio, participaron seis equipos: AiCU, Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma. Se integró un equipo adicional operado por agricultores experimentados (Growers) que serviría como referencia a los equipos. Esta competencia produjo un artículo científico donde se encuentran las conclusiones y resultados del experimento, además de diversos conjuntos de datos útiles para la calibración y validación de los modelos (Hemming et al., 2019).

El equipo Deep\_greens estuvo conformado por personas pertenecientes a la comunidad UNAM, quienes desarrollaron su propio modelo de invernaderos. Por lo que posterior a la competencia este modelo continuó puliéndose y desarrollándose bajo el nombre de G-Sim. Este modelo virtual de invernadero-cultivo fue parte del trabajo de tesis (Pérez Guerrero, 2021). G-Sim es un modelo capaz de simular el ambiente interno del invernadero dadas las condiciones climáticas externas generalmente obtenidas de una estación climatológica. Además de que para aproximar las soluciones de las ecuaciones diferenciales ordinarias asociadas a las variables de estado se utiliza el método RK45, además del método de flujos y variables establecido por Vanthoor et al (2011) (Pérez Guerrero, 2021).

## Planteamiento del problema

El simulador de invernaderos G-Sim, es un modelo que aún requiere de un proceso de calibración y validación. Para ello es necesario conocer qué tanto difieren los resultados simulados contra los resultados reales previamente generados en el *Autonomous Greenhouse Challenge* (Hemming et al., 2019). Asimismo, este proceso es de suma importancia ya que se asegura que el modelo no esté forzado a encajar en una sola condición o experimento específico, sino que también sea adecuado para representar las simulaciones de diferentes experimentos.

Además, para llevar a cabo lo anterior, G-Sim necesita un sistema de almacenamiento de datos. Es necesario recabar los datos de las simulaciones que permitirán evaluar el estado de G-Sim, antes y después del proceso de la calibración y validación. Sin embargo, este sistema de almacenamiento deberá ser eficiente al momento de guardar la inmensa cantidad de datos que se

produce durante una temporada simulada de pepino. Asimismo, el sistema de almacenamiento de datos deberá generar archivos con un tamaño reducido.

## **Justificación**

El modelado de cultivos en invernadero describe el comportamiento de la dinámica de un invernadero. El modelaje ha tomado relevancia debido a su capacidad para describir un sistema de cultivo y manejarlo de la manera más adecuada posible. Esto se logra a través de la optimización del diseño del invernadero, control de clima y manejo de cultivo. Para ello se realiza una recolección de datos, generalmente cuantitativos, provenientes del cultivo y del invernadero que permiten tomar decisiones. Este tipo de decisiones pueden estar relacionadas a el riego, control del clima dentro del invernadero, fertilización, necesidades de agua dadas las condiciones geográficas, rendimiento, optimización de recursos, entre otros (Gary, 1999; Rezvani et al., 2021; Rodríguez et al., 2015).

## **Hipótesis**

- El modelo simulador invernadero-cultivo es capaz de representar adecuadamente las condiciones de invernaderos durante el experimento de cultivo de pepino en el Autonomous Greenhouse Challenge.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Realizar la validación del modelo de simulador invernadero-cultivo (G-Sim).

### **Objetivos particulares**

- Programar un sistema de almacenamiento de datos mediante archivos con el sistema de administración de datos técnicos (TDMS).
- Automatizar la entrada de datos en el simulador de invernaderos (G-Sim).
- Simular en G-Sim con los datos provenientes de los experimentos del Autonomous Greenhouse Challenge.
- Programar la estructura inicial del sistema de calibración del simulador de invernaderos G-Sim.

## **Metodología**

### **Programación del sistema de almacenamiento de datos en formato TDMS**

Se diseñó un programa que almacenara los datos de simulación, utilizando las herramientas TDMS Streaming incluidas en LabView2018™. El programa diseñado permite el almacenamiento de los datos generados durante el periodo de simulación previamente establecido a través de una estructura productor/consumidor. Asimismo, este es capaz de activar o desactivar la opción de guardado y generar una carpeta individual para cada usuario que utilice el simulador. Esto con la finalidad de tener una mejor organización y evitar que los archivos se mezclen entre usuarios. Además, dentro del archivo TDMS se juntan los datos mediante los grupos GH States, GH Controls, GH Flows, Crop States, Crop Controls, Crop Flows y Cucumber array.

### **Automatización de la entrada de datos en el simulador de invernaderos (G-Sim)**

Se realizaron programas en lenguaje LabView2018™ que permitieran la interpretación de las bases de datos provenientes del Autonomous Greenhouse Challenge a G-Sim. El primer programa permitió la lectura de las bases de datos en formato de archivos .csv para extraer los valores y escribirlos en variables globales. Además, se programó que las variables se actualicen de la base de datos conforme avanza el tiempo de la simulación. Cabe destacar que las bases de datos provenientes del Autonomous Greenhouse Challenge tuvieron que ser previamente limpiadas y organizadas.

Un segundo programa desarrollado se encargó de automatizar la configuración de las constantes físicas, de invernadero y del cultivo. Esto con la finalidad de lograr que el usuario pueda modificar todas las constantes del simulador únicamente subiendo un archivo .csv que contenga los valores deseados. Asimismo, se añadió la posibilidad de trabajar con una base de datos climática diferente a la predeterminada. Además, se reordenó la interfaz de usuario de G-Sim. Esto con el objetivo de añadir botones a las nuevas funcionalidades y mejorar la agrupación de cada una de las funcionalidades.

### **Simulación de invernaderos del Autonomous Greenhouse Challenge en G-Sim**

Se realizaron cinco simulaciones del 14 de agosto del 2018 a las 12h al 7 de diciembre del 2018 a la 1h utilizando alrededor de 430 mil valores por simulación, sin contemplar los datos ambientales. La simulación se realizó utilizando los datos provenientes del Autonomous Greenhouse Challenge; cuatro provenientes de los equipos concursantes y una proveniente de la referencia. Lo anterior con la finalidad de evaluar el estado actual del simulador de invernaderos. Esta simulación permitió comparar resultados reales provenientes del Autonomous Greenhouse Challenge contra resultados

simulados provenientes de G-Sim. En las simulaciones se utilizaron los mismos setpoints de los controles climáticos que en las pruebas reales. De este ejercicio se compararon la temperatura del aire ( $T_{air}$ ), porcentaje de humedad relativa en el aire ( $RH_{air}$ ), partes por millón (ppm) de  $CO_2$  en el aire ( $CO_2_{air}$ ), temperatura de las tuberías ( $T_{pipe}$ ), control de la ventilación del techo (Roof Ventilation Control) y el rendimiento acumulado.

Además, los valores de las constantes físicas y de cultivo se establecieron por defecto a excepción de las constantes del invernadero (Greenhouse Constants). Para estas últimas constantes se modificaron los valores necesarios para adaptarlos a las características del invernadero utilizado para el Autonomous Greenhouse Challenge y además se modificaron algunos valores personalizados por cada equipo como lo es la densidad del tallo (Stem Density). Lo anterior se muestra en la Tabla 1. Los valores de las constantes de invernadero restantes se establecieron por default.

Tabla 1. Valores de constantes de invernadero utilizados para las simulaciones realizadas en G-Sim

Nombre del parámetro	Valor en el Autonomous Greenhouse Challenge	Unidades
<b>Greenhouse Construction Parameters</b>		
Surface Area (Including side-walls)	342.96	$m^2$
Mean Greenhouse Height (Floor-Top)	6.3	$m$
Greenhouse Height (Floor-ThScr)	4.85	$m$
Floor Area	96	$m^2$
<b>Ventilation Parameters</b>		
Specific Roof Ventilation Area (ARoof/AFI <sub>r</sub> )	0.3	$m^2$
<b>Thermal Screen Parameters</b>		
PAR Transmission Coefficient of ThScr	0.755	
Thermal Screen Thickness	0.004	$m$
<b>Climate Control Parameters</b>		
Capacity of Fogging System	8.80E-03	$kg/s$
Capacity of External CO <sub>2</sub> Source	400.0032	$mg/s$
Installed PAR Intensity	187	$\mu mol\ m^2/s$
<b>Stem Density at Start</b>		
Croperators	3.2	$stem /m^2$
Deep_greens	2.6	$stem /m^2$
iGrow	2.6	$stem /m^2$
Growers	2.5	$stem /m^2$
Sonoma	3.3	$stem /m^2$
<b>Plant Dry Weight</b>		
Initial Plant DW	32.625	
<b>LAI</b>		
Initial LAI	1.5	

## Programación del sistema de calibración del simulador de invernaderos (G-Sim)

Se desarrolló la base del sistema de calibración para el modelo de invernadero - cultivo G-Sim. Este sistema de calibración cuenta con seis estados y diez VIs. Los primeros seis nuevos estados corresponden a la activación, preparación y finalización de la calibración. Mientras que el funcionamiento de los VIs se divide en dos grupos de cinco; el primer grupo se encarga de grabar los valores iniciales de los estados. Es decir, estos VIs tienen la función de extraer los valores de las variables globales iniciales para agruparlos y grabarlos en una de las cuatro variables globales nuevas. Mientras que los cinco VIs restantes reinician los estados iniciales de la calibración, lo cual provoca el reinicio del proceso de calibración.

De manera general, el flujo del sistema de calibración del simulador G-Sim consistirá en que primero una variable booleana evaluará si se ha presionado el botón de iniciar la calibración en la interfaz de usuario (Figura 1). En caso de ser verdadero, el simulador comenzará el proceso de calibración. Después, los valores iniciales de los estados se registrarán mediante un proceso donde las variables globales serán agrupadas y guardados en una de las cinco nuevas variables globales creadas para el proceso de calibración (Figura 2). Luego, en el siguiente estado se inicia la calibración. El simulador abre y corre a un VI externo llamado "*Objective function*" el cual tendrá como función correr pequeñas simulaciones para la calibración (Figura 3). Además, este caso cuenta con un contador reiniciado a cero el cual evitará que se cree un ciclo infinito. Al mismo tiempo, una variable booleana decide si es tiempo de finalizar la calibración o no. En caso negativo el flujo de datos continua con el estado siguiente. El estado siguiente consiste en elegir un conjunto de parámetros a calibrar que son generados por un VI de optimización (Figura 4). Después de este proceso, el simulador continuará con el siguiente caso donde se espera actualizar los resultados de la calibración cada vez que ocurra una vuelta al ciclo (Figura 5). Para ello, se tienen establecidos unos contadores que evalúan si es momento de terminar la calibración o si es momento de continuar con la siguiente iteración. Cuando el tamaño de la población multiplicado por el número total de iteraciones sea igual a el número de veces que se llama a la "*Objective Function*" será momento de reiniciar la calibración. Mientras que cuando el número total de iteraciones menos uno sea igual al número de iteración actual, el proceso de calibración tendrá que finalizar. Lo anterior permite que la estructura booleana evalúe y decida si es momento de reiniciar los estados iniciales de la calibración dadas las previas condiciones. En caso de ser verdadero pasará al siguiente caso donde cinco VIs extraerán los estados iniciales de las variables globales para la calibración y ahora los volverán a ingresar individualmente a su respectiva variable global (Figura 6). Al finalizar este proceso si la calibración sigue todo el ciclo vuelve a empezar.

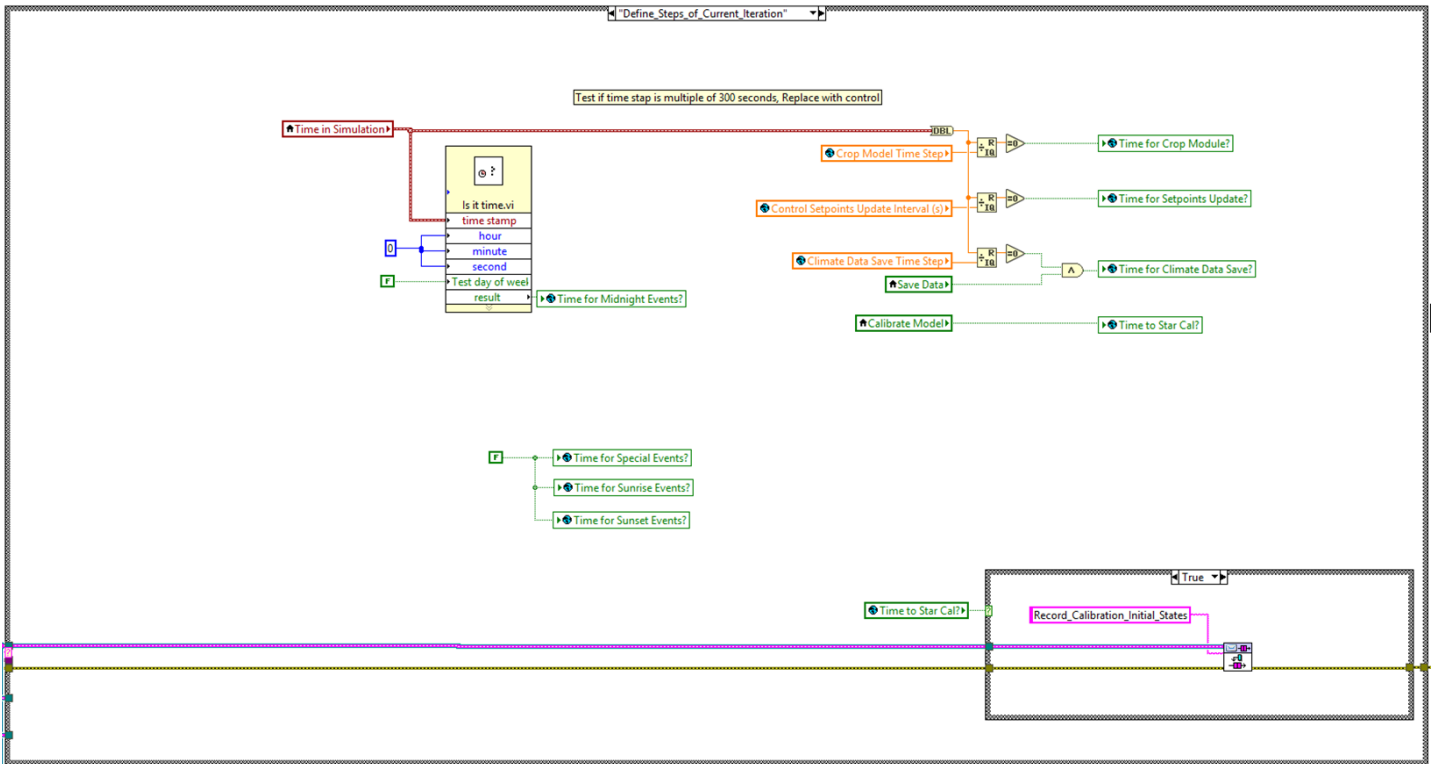


Figura 1. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (1 de 6)  
 Una variable booleana decide si es momento de comenzar con el proceso de calibración. Si el botón de la calibración ubicado en la interfaz de usuario está encendido la variable booleana será verdadera y comenzará el proceso de calibración.



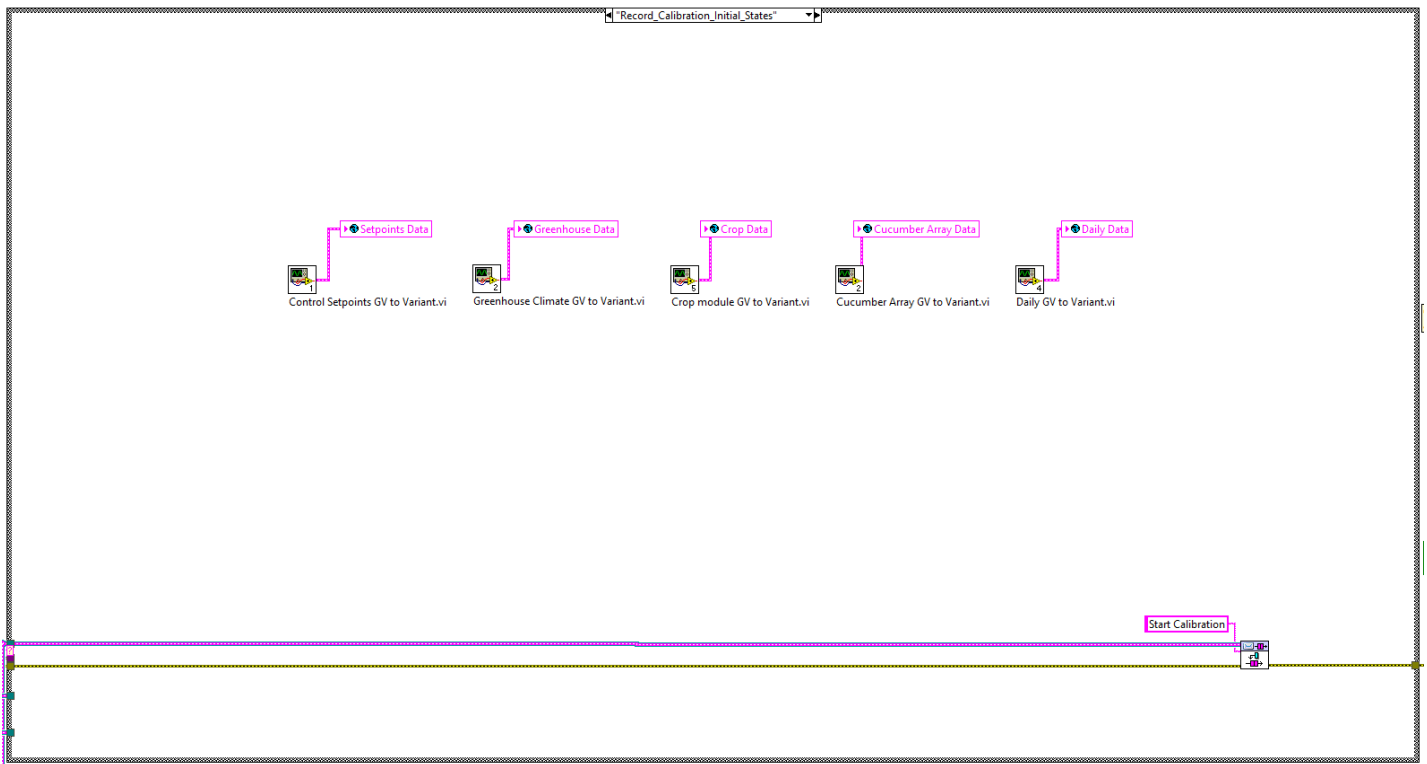


Figura 2. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (2 de 6)  
Se registran los valores iniciales de las variables globales agrupadas en cinco nuevas variables exclusivas para el proceso de calibración.  
El flujo de datos continua en la Figura 3.

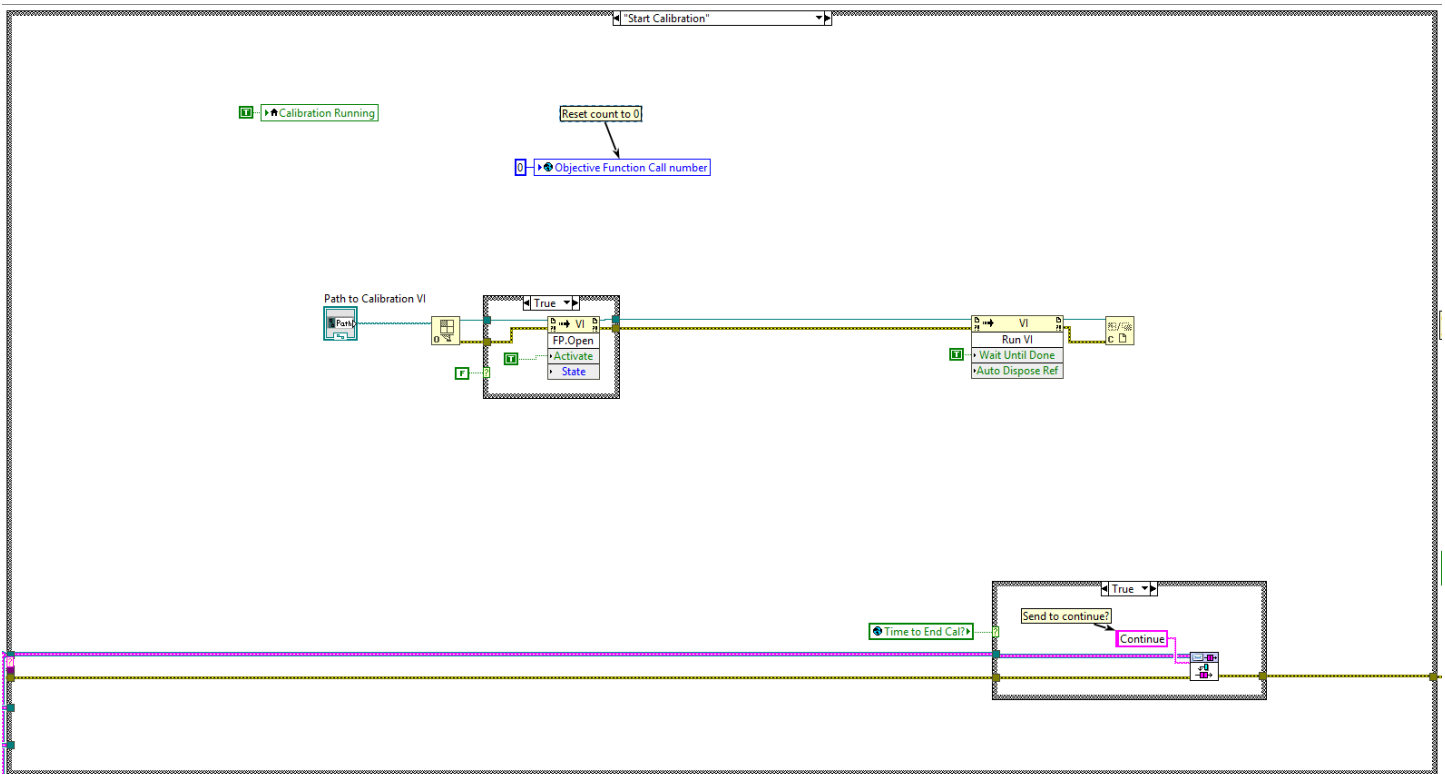


Figura 3. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (3 de 6)  
 Se ejecuta un subVI llamado "Objective function" el cual tiene como función correr pequeñas simulaciones de G-Sim. Al mismo tiempo una variable booleana decide si es momento de terminar la calibración. En caso de que esta variable sea falsa el flujo del proceso la calibración continuará en la Figura 4.

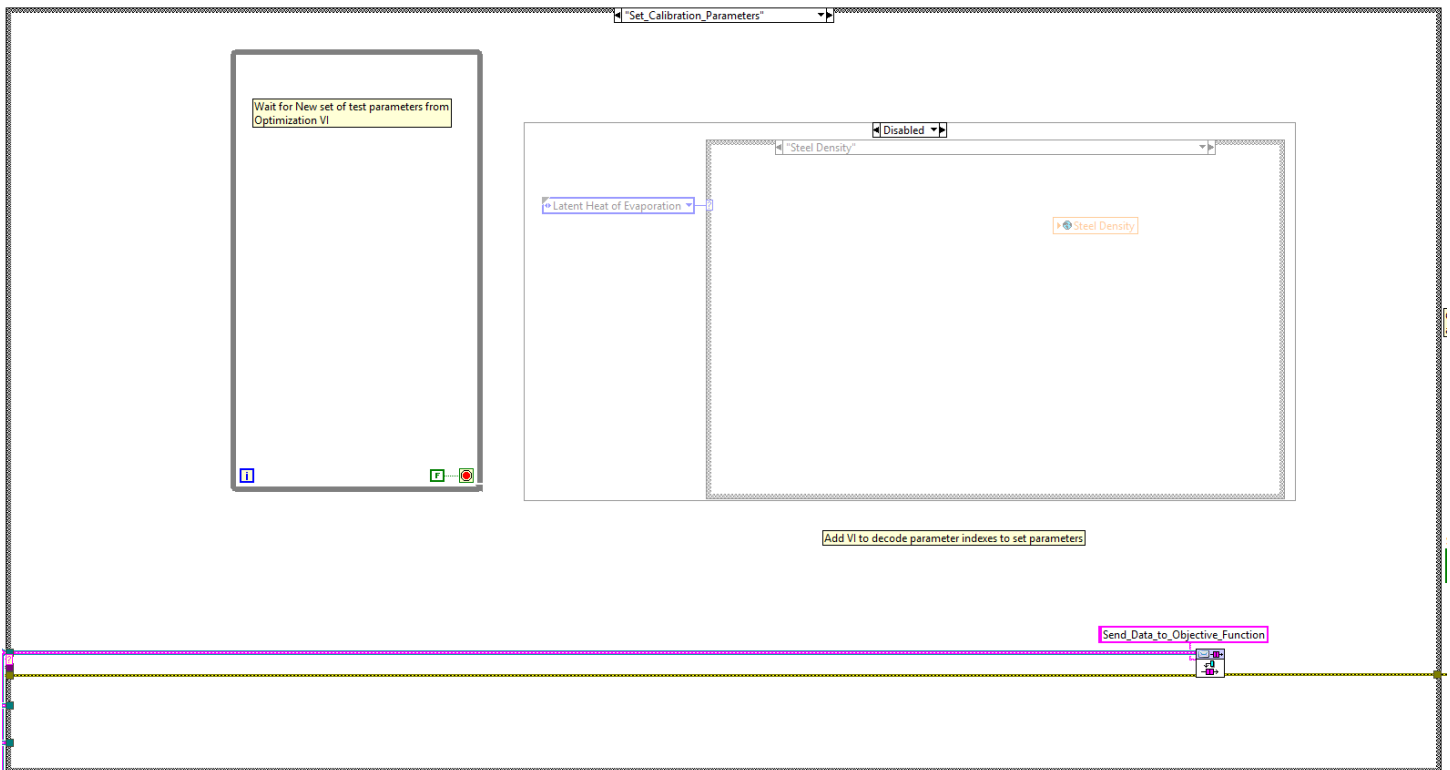


Figura 4. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (4 de 6)  
 Un VI de optimización elegirá un conjunto de parámetros a calibrar y posteriormente el flujo del proceso de calibración continuará en la Figura 5.

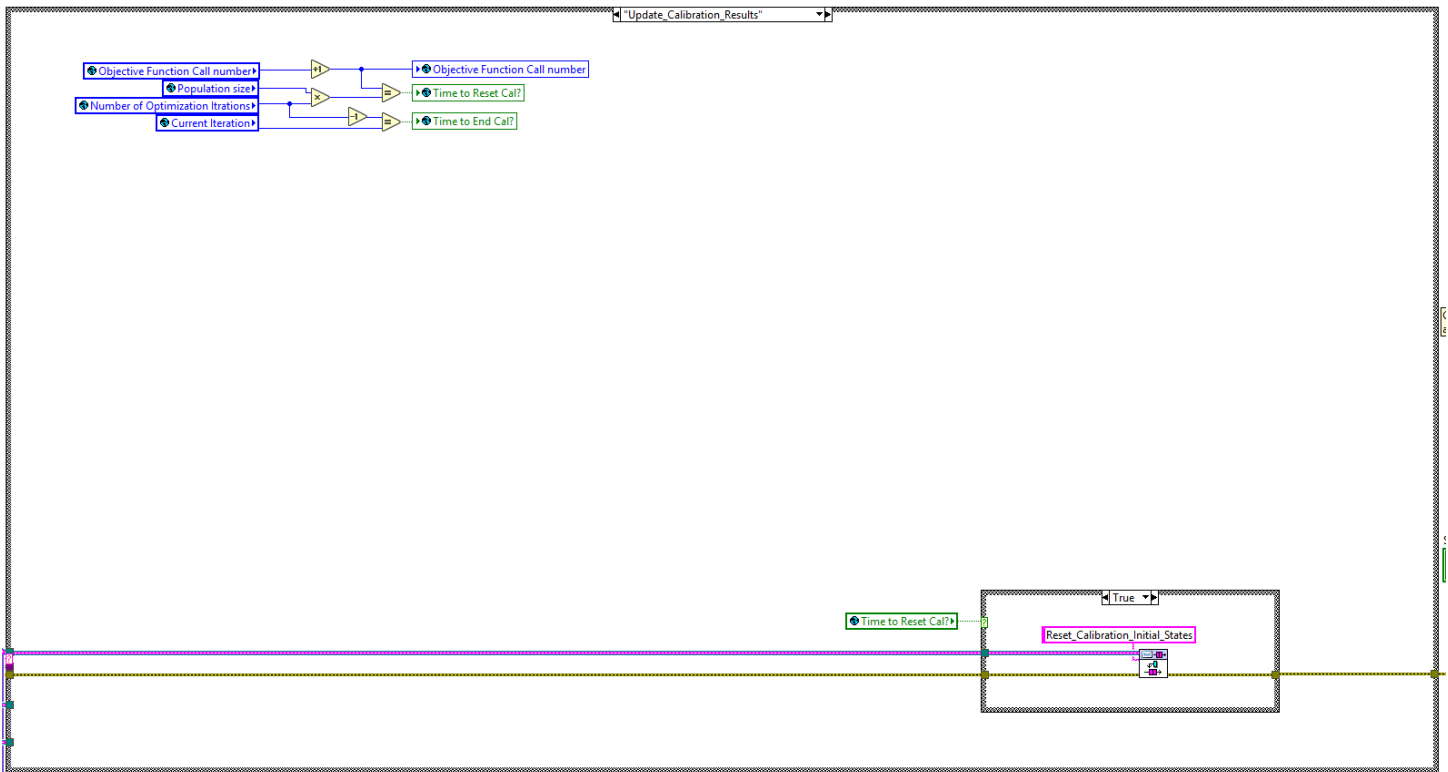


Figura 5. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (5 de 6)  
 Se utilizan unos contadores que permiten al proceso de calibración saber si será momento de terminar el proceso de calibración o si se actualizarán los resultados de la calibración para comenzar con una nueva iteración continuando el flujo del proceso de calibración en la Figura 6.

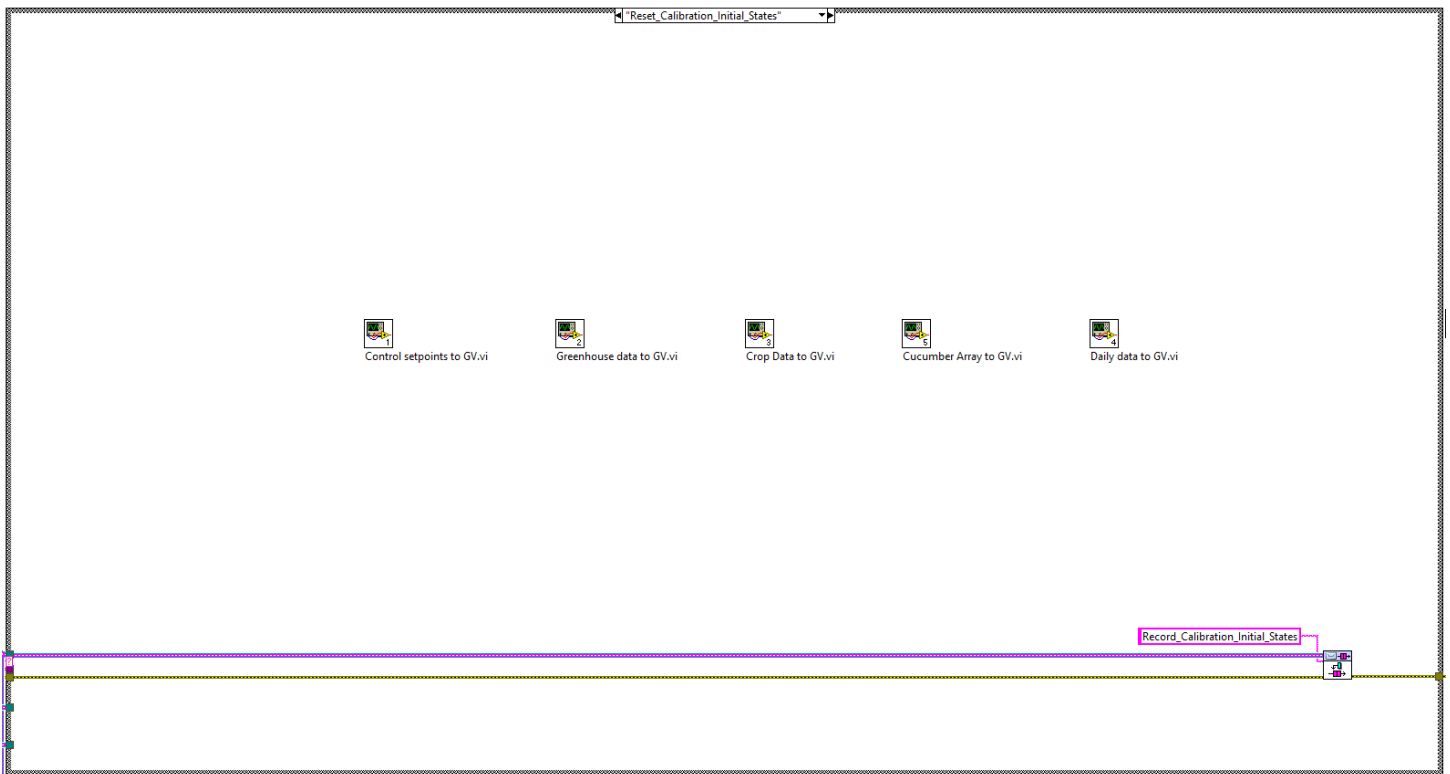


Figura 6. VI programado en LabView2018™ para el flujo del sistema de calibración (6 de 6) Cinco VIs extraerán los estados iniciales guardados en las variables globales de la calibración y se volverán a colocar en su respectiva variable global individual. Después de este proceso si la calibración sigue el ciclo se vuelve a reiniciar.

## Resultados

### **El sistema de almacenamiento de datos en formato TDMS funciona para guardar los valores de la simulación**

Para el almacenamiento de datos en formato TDMS se programaron nueve estados y diez VIs. Los nueve casos corresponden al flujo y estructura de los datos que son enviados al archivo TDMS. Cinco VIs realizan la transformación de variables globales a variantes y los cinco restantes se encargan de clasificar y agrupar los datos en el archivo TDMS.

El sistema de almacenamiento de archivos TDMS primero evalúa si es momento de guardar cada grupo de datos y si se ha activado el botón de guardado de datos en la interfaz de usuario (Figura 13) para así crear una carpeta con el nombre de usuario activo y un archivo TDMS en blanco (Figura 7). Posteriormente se envían a una variable booleana, la cual es verdadera si es momento de guardar (Figura 8); este caso ingresa el tiempo actual de la simulación y los valores de las variables globales. Estos datos se agrupan (Figura suplementaria 1) y se transforman en variantes para después enviarse como mensaje al loop de TDMS correspondiente a cada grupo de datos. Posteriormente, los datos se reciben en su respectivo loop (Figura 9) y después se dirigen a un VI que agrupará y etiquetará los valores de acuerdo con el grupo de datos al que pertenecerán (Figura suplementaria 2). Finalmente, el siguiente estado escribe los datos en el archivo TDMS de manera individual a cada uno de los ocho grupos de datos existentes (Figura 10). La simulación termina cuando una variable booleana evalúa si el botón de guardado está activado, lo cual permitirá cerrar el archivo TDMS que está siendo escrito y además abrir un visor de archivos TDMS integrado a LabVIEW (Figura 11). Después de que la simulación termine, el archivo TDMS podrá ser visto en Microsoft Excel® (Figura 12) y además estará disponible en la carpeta individual del usuario activo.

Por otra parte, se realizaron algunas modificaciones a la interfaz gráfica (Figura 13) que consistieron en añadir o modificar el funcionamiento de cinco botones. Uno de los nuevos botones activa la opción del guardado de datos con el objetivo de que el usuario decida cuándo guardar la información de la simulación. Los cuatro botones restantes corresponden a la función de los tiempos de guardado de cada grupo de datos siendo establecidos por default cada 60 minutos, 150 segundos, 1200 segundos y 300 segundos. Cabe mencionar que estos tiempos de guardado son modificables de acuerdo con las necesidades de los usuarios y en su defecto con los requerimientos necesarios para la correcta lectura de las bases de datos.

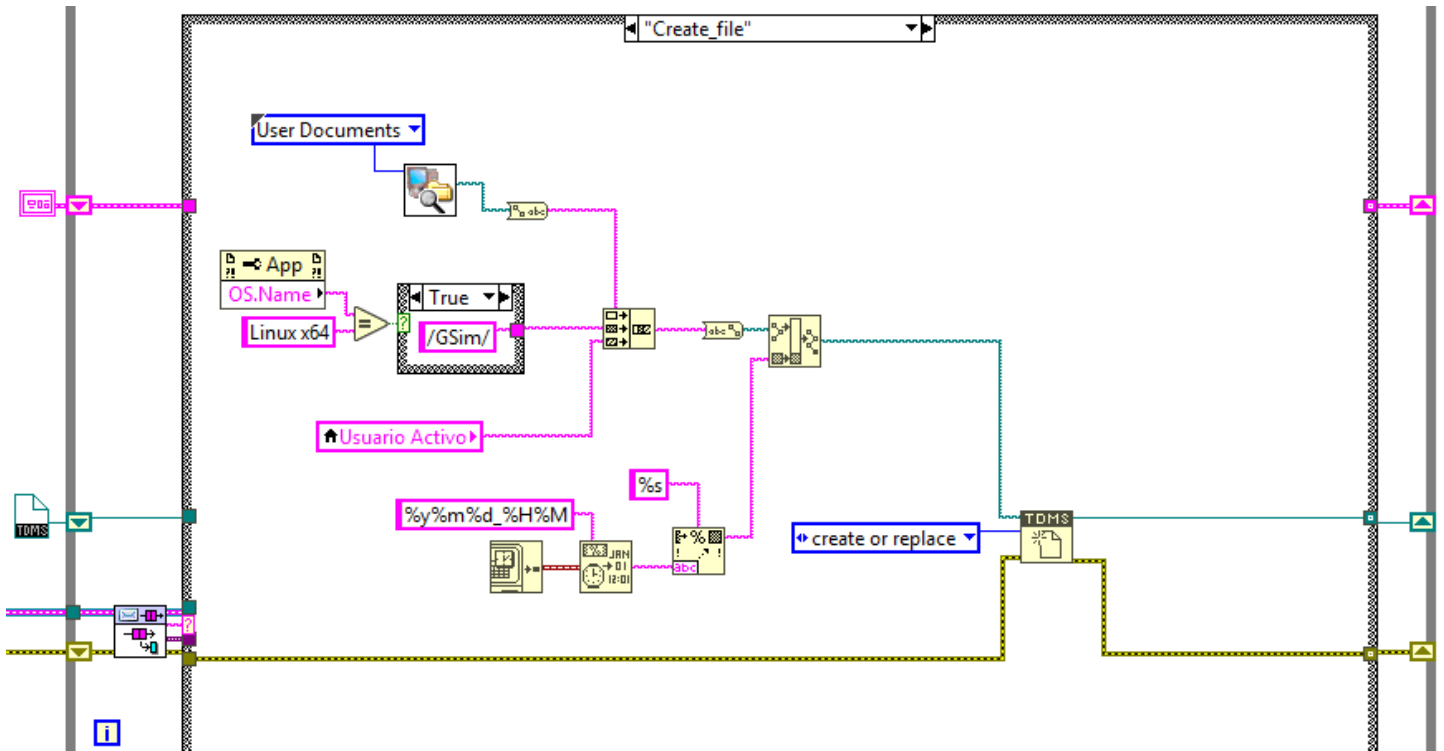


Figura 7. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (1 de 5) Se muestra el inicio del flujo del programa de guardado en TDMS. En este primer paso se define la ruta en la que se guardará el archivo TDMS buscando la ruta de la carpeta documentos del usuario, la ubicación de la carpeta G-Sim acorde con el tipo de sistema operativo (Windows o Linux) y el nombre de usuario activo en el programa G-Sim. Después, el archivo TDMS recibe el nombre de la fecha actual comenzando por la fecha que consiste en los últimos dos dígitos del año (yy), seguido de dos dígitos del mes (mm), continuando con dos dígitos del día (dd). Después, se le añade la hora con dos números (hh), dos números de los minutos (mm) y dos números para los segundos (ss). Al final el formato queda de la siguiente manera (yymmddhhmmss). El archivo TDMS se crea después de que todo lo anterior se ha definido correctamente.

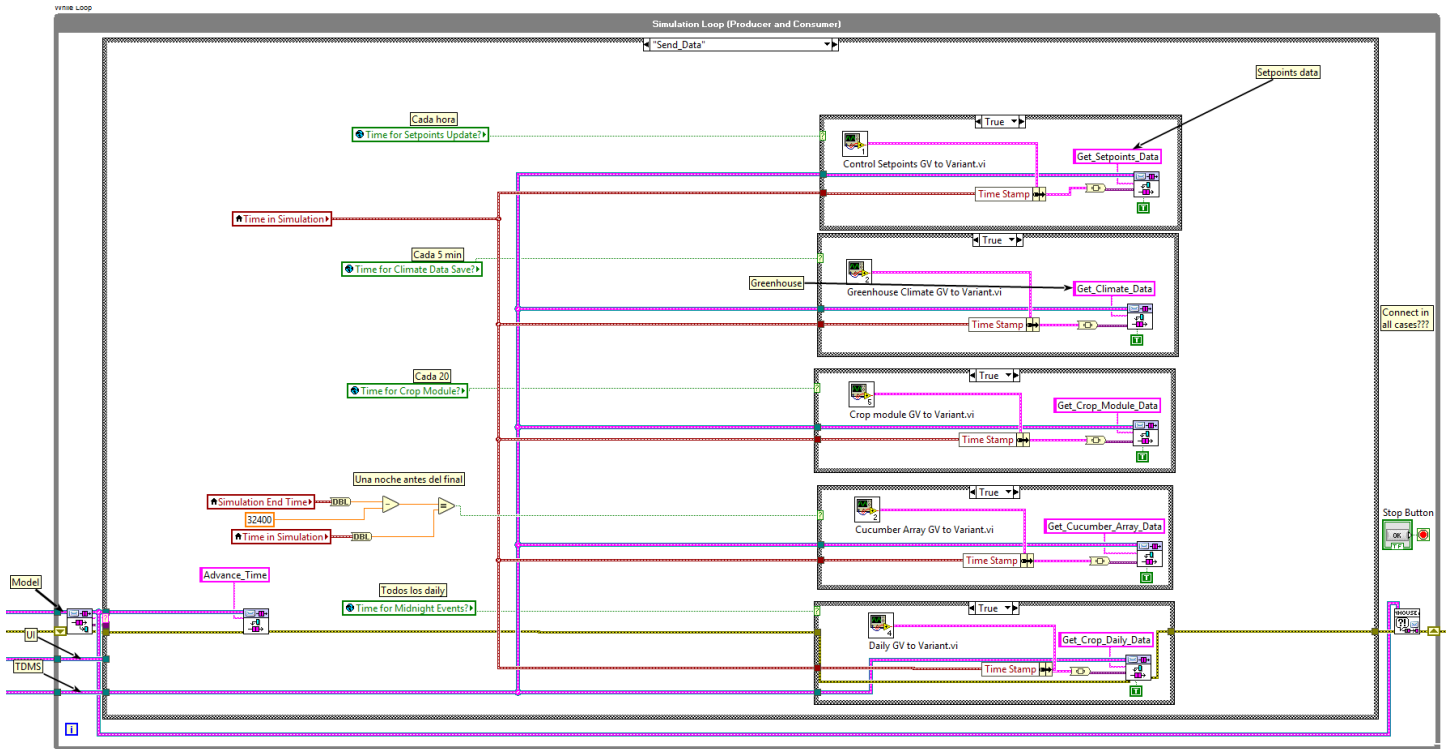


Figura 8. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (2 de 5) En la figura actual se calcula individualmente el momento de guardado para cada tipo de datos para después convertir cada dato en variante.



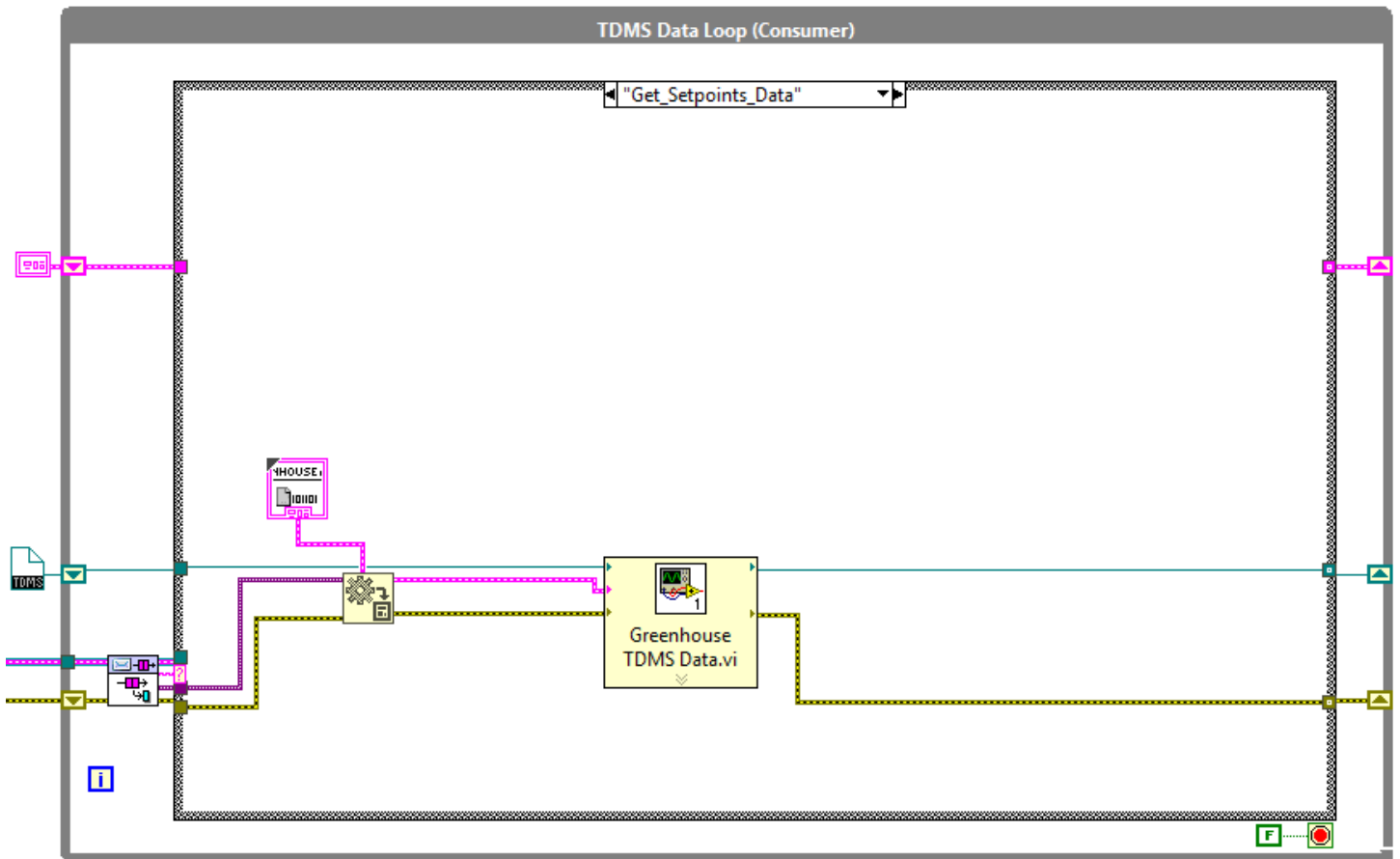


Figura 9. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (3 de 5) Los valores se reciben de acuerdo con la clasificación previamente definida en la Figura 7. Este VI muestra únicamente el flujo de datos (canales) que se clasificarán como datos del invernadero en el grupo de “Greenhouse data”. Sin embargo, ocurrirá exactamente el mismo proceso para clasificar los datos (canales) en otras categorías (grupos) adicionales como “Climate Data”, “Crop Module Data”, “Cucumber Array” y “Crop Daily Data”.

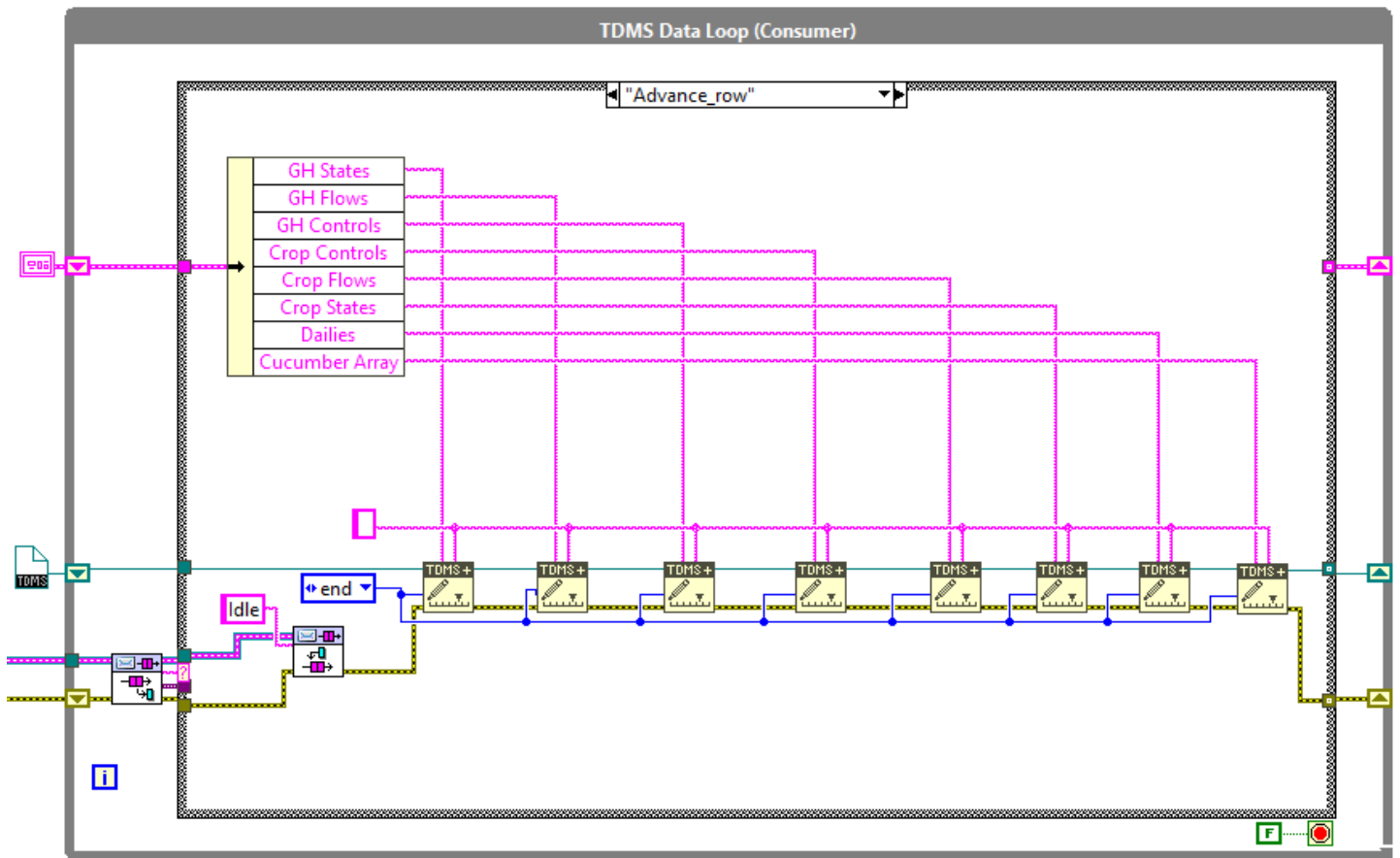


Figura 10. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (4 de 5)

Los valores recibidos ingresan a un VI que se encargará de subclasificar cada variable global en grupos dentro del TDMS. Lo anterior resulta en una clasificación por pestañas al abrir el archivo Excel®. Al escribir cada valor se genera un salto de fila con la finalidad de evitar sobrescribir datos en una misma celda.

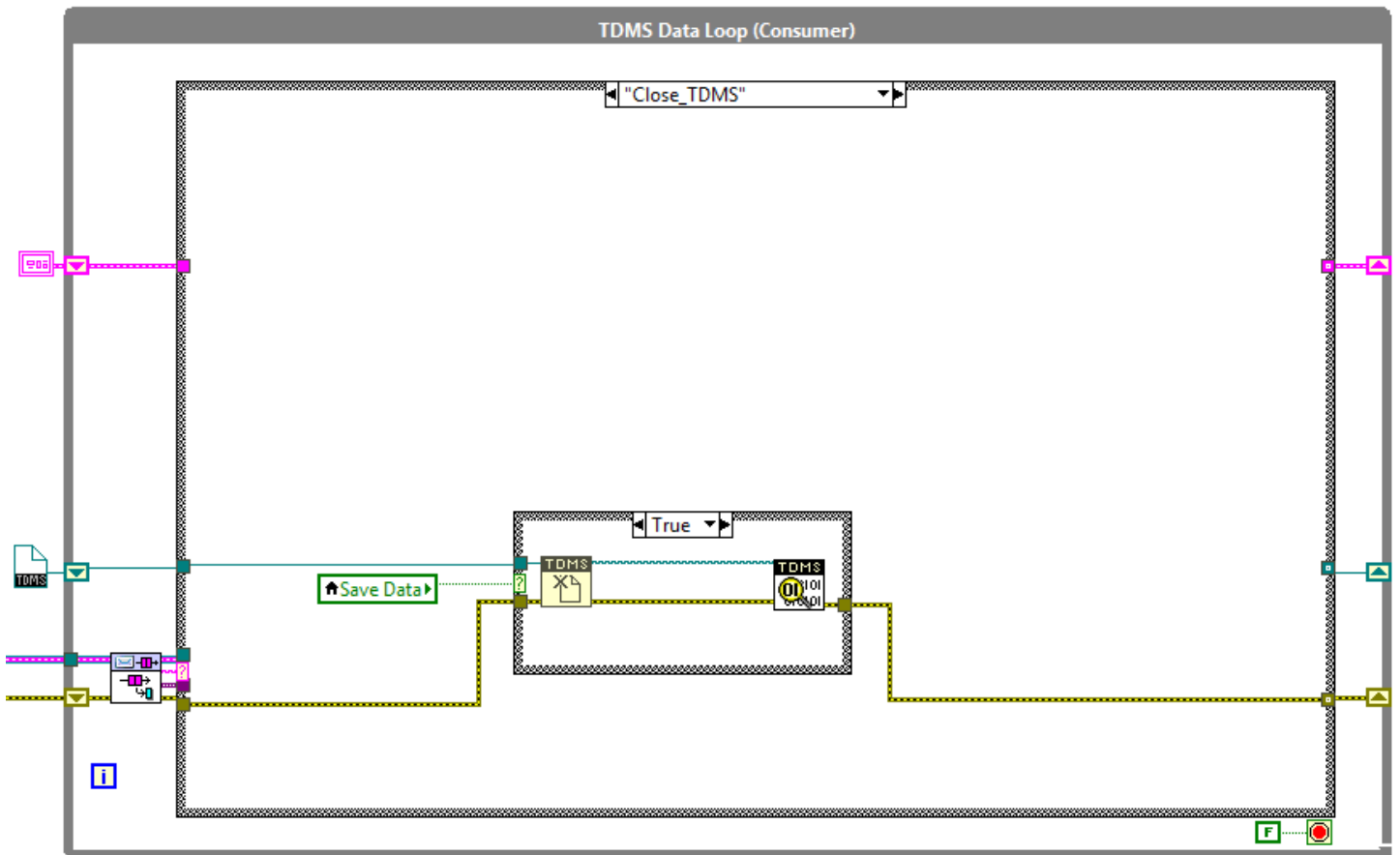


Figura 11. VI programado en LabView2018™ para el guardado de los datos generados durante la simulación en formato TDMS (5 de 5)

El proceso de almacenamiento de datos finaliza cerrando el archivo TDMS y lanzando la vista previa del archivo TDMS mediante una herramienta propia de LabView2018™.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Tiempo Unix Local	TFIrr	TAir	TCan	TPipe	TThScr	TCov,e	TTop	TCov,in	TSo1	TSo2	TSo3	TSo4
2	1534201200	15.00469472	15.1881728	15.59549109	50.35645634	15.15900625	15.61097834	15.20234023	15.62560298	15.00013249	15.00000056	15	14.99999979
3	1534201500	15.12563761	16.23787714	16.04564058	16.23787714	15.8149718	15.75039925	16.22929434	15.79583707	15.01263265	15.00015636	15.00000034	14.99999813
4	1534201800	15.13660942	16.04026845	15.91416547	16.22973784	15.86666052	15.70012324	16.03745808	15.74080572	15.02777888	15.00076127	15.00000355	14.99999948
5	1534202100	15.14395334	15.91575378	15.82100168	15.92837527	15.81927175	15.662118	15.91546997	15.7000295	15.04132931	15.00176993	15.00001291	14.99998984
6	1534202400	15.14821329	15.82747301	15.75064007	15.82747301	15.75913927	15.63251547	15.82864462	15.66870833	15.05313669	15.00311386	15.00003117	14.99998325
7	1534202700	15.15122252	15.76325993	15.69795142	15.76325993	15.70665366	15.61032589	15.7652568	15.64438303	15.06327281	15.00472628	15.00006052	14.99997507
8	1534203000	15.15358	15.71480265	15.65654236	15.71480265	15.6640804	15.5926306	15.71735171	15.6259768	15.07194559	15.00654816	15.00010264	14.99996533
9	1534203300	15.15558821	15.6772411	15.62364933	15.6772411	15.6300916	15.57853128	15.68017751	15.61171539	15.07937708	15.00852973	15.00015878	14.99995405
10	1534203600	15.1574058	15.64754075	15.59715189	15.64754075	15.60291595	15.56879904	15.65076245	15.59900355	15.08577439	15.01062996	15.00022984	14.99994128
11	1534203900	15.15911336	15.62368466	15.57557257	15.62368466	15.58103618	15.56419291	15.62711626	15.58584759	15.09131878	15.0128155	15.00003164	14.99992704
12	1534204200	15.16075059	15.6042702	15.55781939	15.6042702	15.56327319	15.56240078	15.60786531	15.57340908	15.09616329	15.01505954	15.00041885	14.99991137
13	1534204500	15.16233655	15.58830227	15.54309627	15.58830227	15.54873022	15.55938167	15.59201205	15.5649055	15.10043454	15.01734065	15.00053733	14.99989432
14	1534204800	15.16420161	15.58150956	15.54319373	15.58150956	15.5381393	15.72987227	15.58762857	15.72962901	15.10424451	15.01964186	15.0006719	14.99987591
15	1534205100	15.16712962	15.59150016	15.55190838	15.59150016	15.57794566	15.74142445	15.59778845	15.74141157	15.10779253	15.02195144	15.00082245	14.99985619
16	1534205400	15.17043459	15.5991089	15.55707759	15.5991089	15.59012139	15.74354704	15.60534679	15.74369584	15.11121961	15.02426388	15.00098884	14.99983518
17	1534205700	15.17386077	15.60455546	15.56082027	15.60455546	15.59689398	15.7449336	15.61074923	15.74521535	15.11457882	15.02657659	15.00117089	14.99981293
18	1534206000	15.17729021	15.6085171	15.563647	15.6085171	15.60107856	15.74590299	15.61467287	15.74629155	15.11788997	15.0288881	15.00136843	14.99978947
19	1534206300	15.18066832	15.61148851	15.56588414	15.61148851	15.60391515	15.74661847	15.61761069	15.74709194	15.12115823	15.03119735	15.00158125	14.99976484
20	1534206600	15.18397201	15.61380722	15.56773933	15.61380722	15.60600398	15.74717488	15.61989888	15.74771691	15.12438287	15.03350338	15.00180914	14.99973906
21	1534206900	15.18719384	15.61569911	15.56935107	15.61569911	15.60765899	15.74762986	15.6217622	15.74822901	15.12756138	15.03580522	15.00205192	14.99971219
22	1534207200	15.19033393	15.61731312	15.57080788	15.61731312	15.60905408	15.7480191	15.62334892	15.7486677	15.13069126	15.03810185	15.00230936	14.99968423
23	1534207500	15.1933958	15.61874679	15.57216701	15.61874679	15.61029005	15.74836521	15.62475609	15.74905815	15.13377071	15.04039224	15.00258125	14.99965524
24	1534207800	15.19638417	15.62006343	15.5734645	15.62006343	15.61142908	15.7486826	15.62604677	15.74941649	15.13679876	15.04267535	15.00286737	14.99962524
25	1534208100	15.19930409	15.62130446	15.5747243	15.62130446	15.6125229	15.74898137	15.6272622	15.74975401	15.13977524	15.04495018	15.0031675	14.99959427
26	1534208400	15.20286628	15.65156942	15.60499163	15.65156942	15.65007789	16.08811492	15.66806228	16.08675056	15.14271944	15.04721585	15.0034814	14.99956235
27	1534208700	15.20900908	15.71799497	15.6552685	15.71799497	15.72636514	16.11706129	15.73383217	16.1083196	15.14589723	15.04947534	15.00380884	14.99952952
28	1534209000	15.21623865	15.76360262	15.69030887	15.76360262	15.77662616	16.12811171	15.77873101	16.12082902	15.14950499	15.05173983	15.00414967	14.9994958
29	1534209300	15.22378451	15.79561404	15.71638184	15.79561404	15.81056931	16.13586144	15.8101928	16.12952617	15.15354787	15.05402256	15.00450381	14.99946124
30	1534209600	15.23127939	15.8188559	15.73655735	15.8188559	15.83432549	16.1415314	15.83299096	16.13585257	15.15795898	15.05633505	15.0048713	14.99942585
31	1534209900	15.23856374	15.83636994	15.75276166	15.83636994	15.85160873	16.14584194	15.85013516	16.14064827	15.16265151	15.05868592	15.00525223	14.99938967
32	1534210200	15.24558276	15.85008422	15.76622265	15.85008422	15.86471266	16.1492476	15.86353246	16.14442959	15.1675422	15.06108079	15.00564677	14.99935272
33	1534210500	15.25233132	15.86122457	15.77773466	15.86122457	15.87506253	16.15204047	15.8743944	16.14752499	15.17256027	15.06352274	15.00605511	14.99931504
34	1534210800	15.25882527	15.87058065	15.78781668	15.87058065	15.88335	16.15440568	15.88350063	16.15014407	15.17764934	15.0660128	15.00647746	14.99927666
35	1534211100	15.26508727	15.87866325	15.79681341	15.87866325	15.89074235	16.15646957	15.89135385	16.15242551	15.18276637	15.06855044	15.00691401	14.99923761
36	1534211400	15.27114025	15.88580758	15.80495793	15.88580758	15.89701399	16.15831248	15.89828925	16.15445325	15.18787942	15.07113409	15.00736496	14.99919792
37	1534211700	15.27700482	15.89224399	15.81241194	15.89224399	15.9026077	16.15997697	15.90453643	16.15628085	15.19296539	15.07376139	15.00783048	14.99915762
38	1534212000	15.28398701	15.95845758	15.87083014	15.95845758	15.97229799	16.73931126	15.99085236	16.72400857	15.19804272	15.07642968	15.00831073	14.99911675

Figura 12. Contenido de un archivo TDMS proveniente de una simulación visto mediante Excel®

Main Menu Settings Calibration Validation Modeling Simulation Results

**Simulation Start Time**  
9:00:00 AM  
1/1/2017

**Simulation End Time**  
9:00:00 AM  
5/5/2017

Climate Model Time Step: 150 s

Crop Model Time Step: 1200 s

Control Setpoints Update Interval: 60 min

Planting Density: 1.2

Stem Density at Start: 1.6

Initial LAI: 0.23

Initial Plant DW: 0.3

Setpoints Control Style: Formula

**State Variables**  
(formulas inputs)

Variable Names	Abrev.
Greenhouse Air CO2 Concentration	CO2A
Greenhouse Top Compartment CO2 Concen	CO2T
Greenhouse Air Relative Humidity	RH4ir
Canopy Relative Humidity (inside stomatal ci	RHCa
Greenhouse Cover Relative Humidity (near s	RHCo
Thermal Screen Relative Humidity (near surfi	RHTh
Greenhouse Top Compartment Relative Hum	RHTO
Greenhouse Air Temperature	TAir
Canopy Temperature	TCan
Cover Temperature (external)	TCovE
Cover Temperature (internal)	TCovI
Greenhouse Floor Temperature	TFir
Heating Pipe Temperature	TPipe
Soil Layer 1 Temperature	TSoil1
Soil Layer 2 Temperature	TSoil2
Soil Layer 3 Temperature	TSoil3
Soil Layer 4 Temperature	TSoil4
Soil Layer 5 Temperature	TSoil5
Thermal Screen Temperature	TThrS
Greenhouse Top Compartment Temperature	TTOP
Greenhouse Air Vapour Pressure	VP4ir
Canopy Vapour Pressure (inside stomatal ca	VP4Ca
Greenhouse Cover Vapour Pressure (near st	VP4Co

**Formulas to Dinamically Calculate Setpoints**

```

#-*- coding: utf-8 -*-
Adjust the following code to set the control variables dynamically
Use Python Programming Language syntax

# Do not modify following function (Adjust_Setpoints)
def Adjust_Setpoints(CO2Air, CO2Top, RH4ir, RHTop, TAir, TCovE, TCovI, TPipe, TSoil1, TSoil2, TSoil3,
                    TSoil4, TSoil5, TThrS, TTOP, VP4ir, VP4Ca, VP4Co, VPCan, VPTop, IGlob, TOut, TSky, TSoOut, RH4Out, VP4Out, CCov, WSpd, Yr, Mth,
                    MthD, Hr, min, WKD, YrD, ChkStep):

# Code that determines Day/Night Setpoints
if IGlob < 5:
    HeatSet = 16
    VentSet = 25
    VPDSet = 1
else:
    HeatSet = 20
    VentSet = 25
    VPDSet = 1.2

# Code that turns ON/OFF the Lamps
if IGlob < 150 and Hr > 7 and Hr < 23:
    Lamp = 1
else:
    Lamp = 0

# Code that sets the CO2 enrichment setpoint
if IGlob > 5 or Lamp > 0:
    CO2Set = 900
else:
    CO2Set = 400

```

**Control Setpoints**  
(formulas outputs)

Abbreviations	Units
HeatSet	C
VentSet	C
MinRail	C
MinCrop	C
MinLee	ratio
MinWind	ratio
VPDSet	kPa
ThScrSet	ratio
InBlkScrSet	ratio
ExBlkScrSet	ratio
WTW	ratio
Lamp	TRUE / FALSE
CO2	ppm
Wtrint	min
WtrDur	s
Flowers	ratio
Leaves	leaves ster
Stems	stems m^-2
Dcap	-

Check Syntax Syntax OK

Climate Data Save Time Step: 300 s

Save Data

Figura 13. Pestaña Modeling

Se observan nuevos botones para activar el guardado de datos (flechas en rojo) TDMS y ajustar los tiempos de guardado de acuerdo con el tipo de datos.

## **El simulador de invernaderos (G-Sim) funciona de manera semiautomática**

Para automatizar la carga y lectura de los valores de las constantes en el simulador de invernaderos se realizaron tres VIs. El primer VI funciona extrayendo los valores de un archivo .csv y posteriormente los escribe en las variables locales correspondientes (Figura 14). Para ello también fue necesario la creación de botones que permitieran cargar el archivo .csv (Figura 15) que contiene los valores que se utilizarán para cada variable global.

El segundo VI lee la base de datos en formato .csv que se utilizará durante la simulación y posteriormente escribe los valores en variables globales (Figura 16). Esto se hace leyendo el tiempo de cada fila de la base de datos. Además, el programa realiza algunas transformaciones para que los valores coincidan con las unidades utilizadas en el simulador. Finalmente, este VI requirió agregar un pequeño programa que carga este VI en vez de utilizar los valores por default (Figura 17).

El tercer VI cambia la base de datos climática utilizada por default por una base de datos climática a elección del usuario (Figura 18). También, este programa necesitó un pequeño programa que permitiera la sustitución de la base de datos climática establecida por defecto a una nueva base de datos climática personalizada (Figura 19).

Finalmente, el proceso de automatización del simulador de invernaderos necesitó un reordenamiento de las pestañas de la interfaz gráfica (Figura 20). Lo anterior fue con la finalidad de crear más espacio para nuevas funciones y agrupar funcionalidades similares; por ejemplo, se agruparon las constantes físicas, de invernadero y de cultivo.

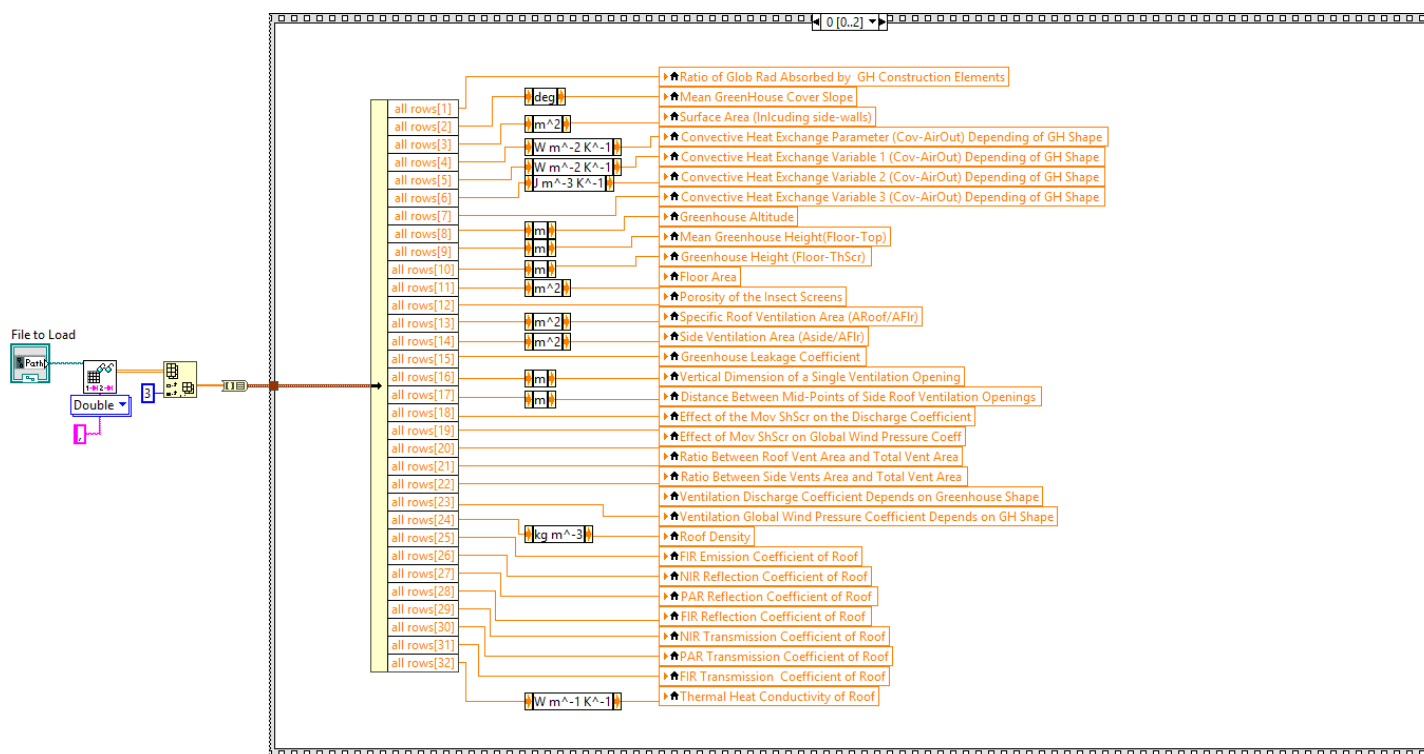


Figura 14. VI programado en LabVIEW2018™ para el cambio automático de las constantes físicas, de invernadero y de cultivo. El programa lee el archivo .csv que contenga los valores de las constantes. El programa lee específicamente la columna número tres, la cual deberá tener un valor por default o modificado por el usuario. Después, cada fila de la columna tres se le agregan las unidades (en caso de ser necesario) y se asignan a una variable local que mostrará el valor en la interfaz del usuario.

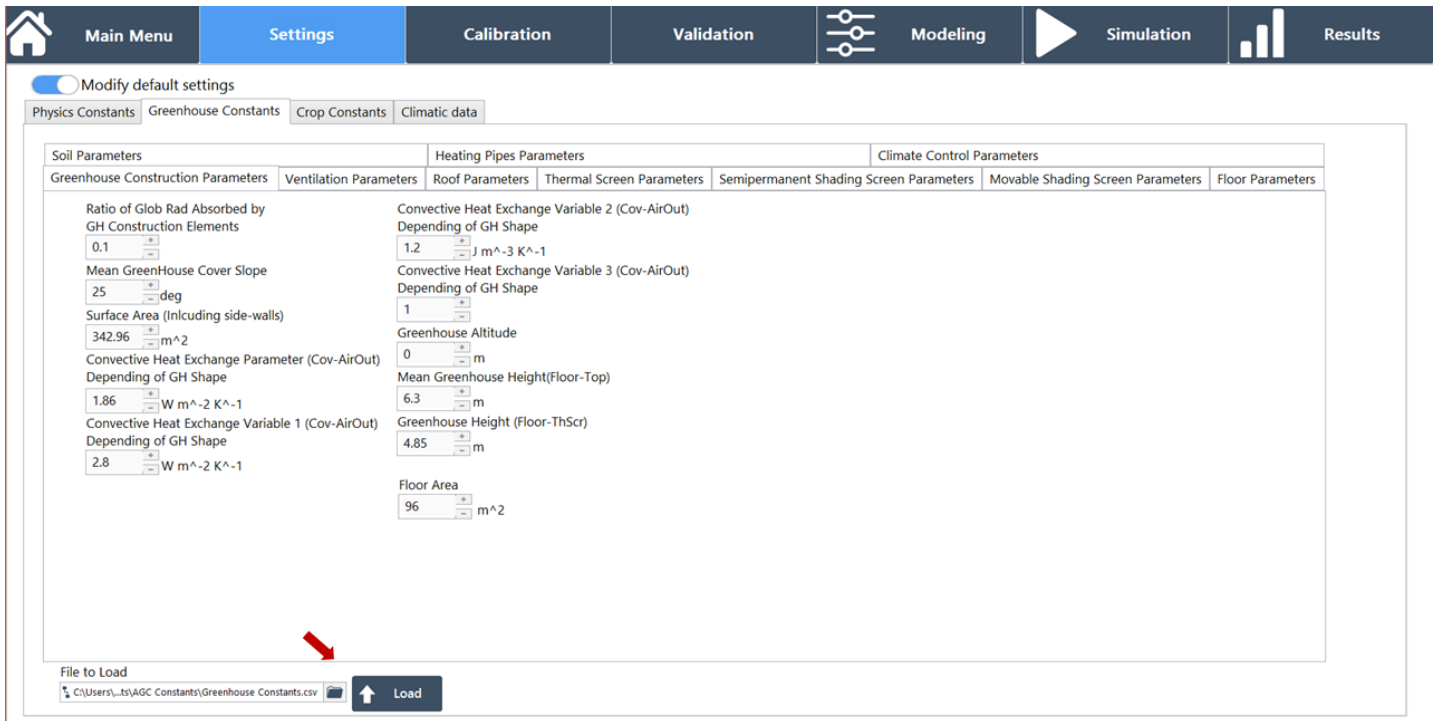


Figura 15. Pestaña Settings

Se observan en la parte inferior izquierda (flecha roja) los botones que permiten cargar automáticamente las constantes. Se repite el mismo botón para las subpestañas Physic Constants, Greenhouse Constants y Crop Constants. Cada valor dentro de las cajas es el resultado del valor definido al utilizar la función de “File to Load” como se detalla en la Figura 4.

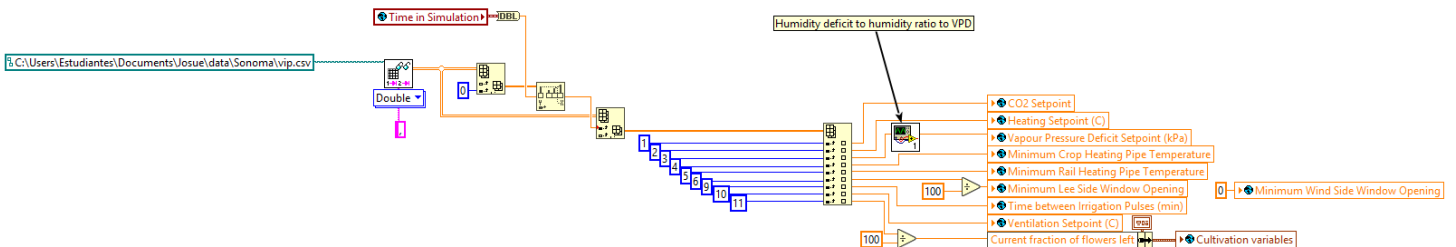


Figura 16. VI programado en LabVIEW2018™ para la interpretación de las bases de datos provenientes del Autonomous Greenhouse Challenge al simulador de invernaderos G-Sim

El VI primero lee la base de datos en formato .csv del Autonomous Greenhouse Challenge. Después, en la fila cero se busca el tiempo actual de la simulación en proceso para utilizar las columnas de la 1-6 y de la 9-14. En algunos casos el VI realiza transformaciones a los valores de la base de datos para poder ser utilizados en el simulador. Luego el VI ingresa los valores de la base de datos ya compatibles a los setpoints. Es decir, el VI asigna a G-Sim las órdenes que cada equipo del Autonomous Greenhouse Challenge asignó durante el experimento para el control del invernadero.



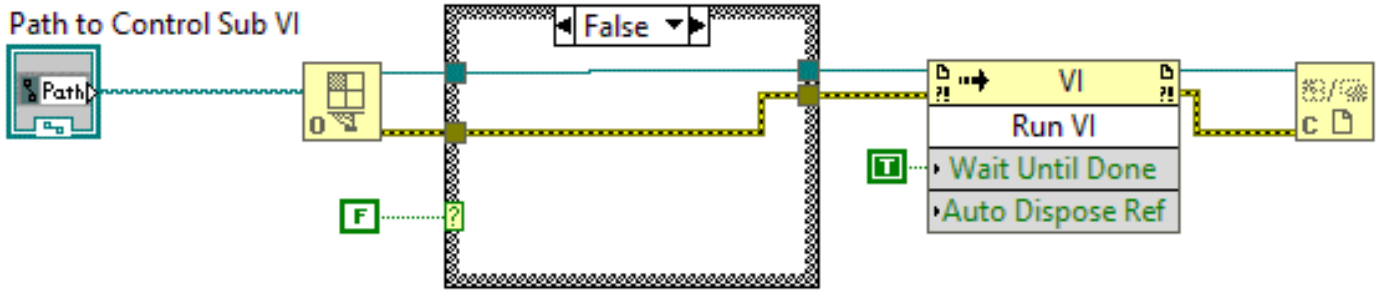


Figura 17. VI programado en LabVIEW2018™ para implementar las bases de datos del Autonomous Greenhouse Challenge. El VI primero lee la ruta en la que se encuentra el VI que interpreta las bases de datos y después lo corre durante toda la simulación.

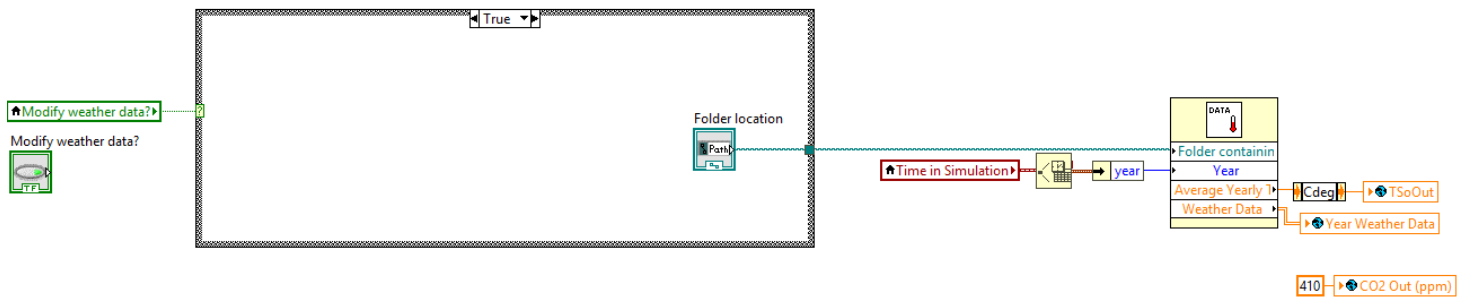


Figura 18. VI programado en LabVIEW2018™ para modificar la base de datos climática. El VI identifica si se ha activado la opción de modificar los datos climáticos. Si es verdadero se lee la ruta de la nueva base de datos climática y el simulador continúa con el proceso por default solo que con nuevos valores climáticos.



Figura 19. Pestaña Settings

Se observa en la parte inferior izquierda (flechas en rojo) los botones que permiten cargar y activar una nueva base de datos climática. Al activar el botón: "Modify weather data?" el simulador dejará de leer la base de datos climática establecida por default y ahora leerá la base de datos que se encuentra en la ruta y que ha sido establecida por el usuario.

Usuario  
 Josue

**Start**

Usuario Activo  
 Josue

**Close Sesion**

Nuevo Usuario

**Add User**

## UNAM G-Sim

Presionar el botón de Ayuda para abrir PDF con instrucciones de uso.

Usando los parámetros precargados, se simula un invernadero tipo Venlo equipado con:

- Calefacción por caldera de agua caliente
- Fuente externa de bióxido de carbono.
- Sistema de nebulización
- Lámparas de sodio a alta presión

Se puede simular cualquier otro tipo de invernadero cambiando los parámetros.

Nota: En un procesador Intel core i7, la simulación avanza a una tasa de una hora simulada cada segundo de procesamiento. De modo que la simulación de una temporada de cultivo de 5 meses se demora por lo menos una hora.

Dudas, sugerencias, reporte de bugs y cualquier otro asunto relacionado con este simulador, favor de contactar al Dr. Aarón. I. Vélez Ramírez (aaron.velez@comunidad.unam.mx)

Desarrollado por Uriel G. Pérez Guerrero y Aarón I. Vélez Ramírez en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad León con Apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México a Trávez del Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME), Proyecto PE212819. Todos Los Derechos Reservados © 2020 Universidad Nacional Autónoma de México.

Escuela Nacional de Estudios Superiores  
 Unidad León

dgapa  
 Dirección General de Asuntos del Personal Académico

Figura 20. Nueva interfaz de usuario G-Sim

Se destacan las nuevas pestañas Settings, Calibration, Validation y Modeling en la parte superior.

## **Los resultados del simulador de invernaderos (G-Sim) muestran un valor de discrepancia cercano al cero**

Posterior a cada simulación, se realizaron histogramas para cada variable de estado evaluada; estos histogramas muestran el desempeño del simulador con los parámetros default. Es decir, el simulador sin calibrar. Se graficaron las frecuencias de las diferencias entre las variables de estado simuladas y reales para: la temperatura del aire ( $T_{air}$ ), humedad relativa ( $RH_{air}$ ),  $CO_2$  en el aire ( $CO_{2air}$ ), temperatura de las tuberías ( $T_{pipe}$ ) y control de ventilación (Roof Ventilation). Finalmente se calculó la media de cada gráfica y la raíz de error cuadrado medio o RMSE por sus siglas en inglés.

Observando la media, los histogramas de discrepancia de la temperatura del aire muestran una subestimación de aproximadamente  $2^{\circ}C$  (Figura 21). Los histogramas muestran un rango de variación que va de los  $-6^{\circ}C$  a  $13^{\circ}C$ . Sin embargo, se observa la mayoría de los datos tienen una media de  $-0.59$ ,  $-0.61$ ,  $-0.45$ ,  $-1.59$  y  $-0.95$  para los equipos de Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers respectivamente. En general la RMSE de estas gráficas va de  $3.13$  a  $4.11$  lo que significa que el modelo está cometiendo un error en promedio de  $3.13$  a  $4.11^{\circ}C$  en relación con los valores reales.

La humedad relativa del aire ( $RH_{air}$ ) esta ligeramente sobreestimada (Figura 22). Los histogramas muestran un rango de variación que va del  $-20\%$  al  $40\%$ . Sin embargo, la simulación hecha de los equipos de iGrow y Growers (Figura 22c y 13e) tienen la media cercana al cero con valores de  $1.51$  y  $3.96$  respectivamente, mientras que Deep\_greens (Figura 22b) fue el experimento que más lejos se encuentra del valor cero con una media de  $16.47$ . Para la humedad relativa se observa un RMSE que va de los  $13.24$  a los  $45$ . Siendo la simulación hecha para el equipo de Sonoma donde se comete un mayor error promedio en relación con los valores reales y la simulación de iGrow la que tiene el menor error.

Los histogramas de discrepancia para el  $CO_2$  en el aire muestran que esta variable de estado se encuentra ligeramente subestimada (Figura 23). El rango de la distribución se encuentra entre los  $-800$  ppm a los  $600$  ppm. Sin embargo, se observa una distribución normal donde la media de los datos se sitúa en rangos de  $-160.92$  a  $-6.90$ . El equipo mejor estimado fue Deep\_greens (Figura 23b) el cual obtuvo una media de  $-6.90$ , mientras que Growers fue el más subestimado teniendo una media de  $-160.92$ . En este experimento la RMSE fue de  $161.62$  a  $256.77$ ppm perteneciendo a los equipos de Croperators y Growers respectivamente.

Los histogramas de discrepancia para la temperatura de las tuberías se encuentran demasiado sobreestimadas (Figura 24). En general los experimentos muestran una variación de  $-20^{\circ}C$  a  $100^{\circ}C$ . La mayoría de los experimentos tiene una media de discrepancia cercana al  $30^{\circ}C$ . Asimismo, Croperators, Deep\_greens y Growers (Figura 24a-c) tienen una distribución normal más definida. Por el contrario, el resto de los equipos no tienen una distribución clara. Sonoma tiene la

media más baja siendo 25.01 mientras que iGrow tuvo la media más alta con un valor de 45.17. Para este experimento la RMSE va de los 32.72 a los 51°C obtenidos por Sonoma y iGrow respectivamente y siendo un valor demasiado alto para ser temperaturas.

Finalmente, los histogramas resultantes de la ventilación del techo se encuentran ligeramente subestimados (Figura 25). Sin embargo, la mayoría de los valores (alrededor de 15 mil a 20 mil datos) se encuentran con una discrepancia cercana al cero. En general, el rango de los valores de discrepancia se encuentra entre el -0.6 y el 1. Todos los equipos muestran una distribución normal donde la media de los valores va de -0.04 a 0.03. Mientras que la RMSE tiene un rango de -0.24 a 0.28 en una escala del 0 al 1.

### **Los resultados del simulador de invernaderos (G-Sim) muestran un rendimiento bajo**

Una vez finalizadas las simulaciones se recolectaron los registros del rendimiento acumulado para realizar gráficas que demuestran el desempeño en cuanto al rendimiento (cosecha) durante toda la simulación (Figura 26). Para ello se comparó la producción real contra la producción simulada.

En las gráficas se observa que, en la mayoría de las simulaciones, el rendimiento simulado es menor al rendimiento obtenido en el experimento real. En la mayoría de las simulaciones el rendimiento fue de 30 kg/m<sup>2</sup> a 15 kg/m<sup>2</sup> menos en comparación con los resultados reales. El equipo con la mayor diferencia fue el de Growers (Figura 26e) donde se obtuvo cerca de 15 kg/m<sup>2</sup> simulados contra 50 kg/m<sup>2</sup> reales.

En contraste, el equipo de Croperators y Deep\_greens (Figura 26a-b) tuvieron una mejor representación del rendimiento, siendo este último el que tuvo un rendimiento simulado bastante similar al rendimiento real. La producción real acumulada para Deep\_greens fue aproximadamente 40 kg/m<sup>2</sup> (Figura 26b), mientras que la producción simulada acumulada fue de aproximadamente 30 kg/m<sup>2</sup> (Figura 26b). Por otra parte, el equipo de Croperators también obtuvo un rendimiento apegado al rendimiento real, aunque no tanto como el de Deep\_greens. El equipo de Croperators obtuvo un rendimiento real acumulado de aproximadamente 50 kg/m<sup>2</sup>, mientras que el rendimiento simulado acumulado fue de aproximadamente 40 kg/m<sup>2</sup> (Figura 26a). Cabe mencionar que a pesar de que ambos equipos tienen una diferencia de 10 kg/m<sup>2</sup> al comparar el rendimiento real y simulado, Deep\_greens fue el equipo que durante toda la simulación las líneas reales y simuladas están casi solapadas.

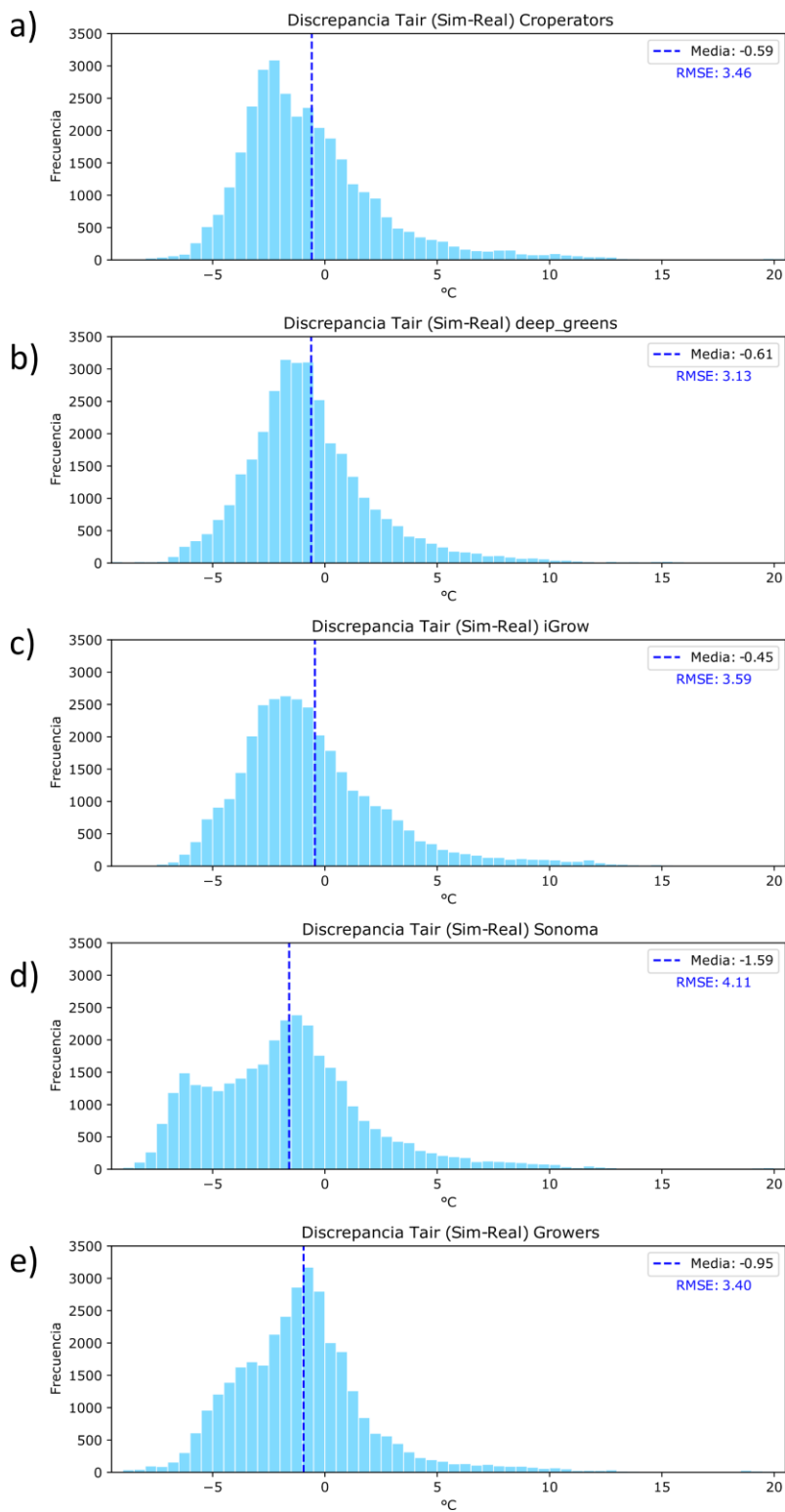


Figura 21. Gráficas de discrepancia de la temperatura del aire (Tair)

Cada una de las gráficas pertenece a uno de los equipos participantes en el Autonomous Greenhouse Challenge; Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers. El histograma grafica la diferencia de los valores simulados y los reales. La línea vertical azul muestra el valor de la media. La mayoría de la temperatura del aire está subestimada especialmente para el equipo de Sonoma que tiene una media de -1.59.

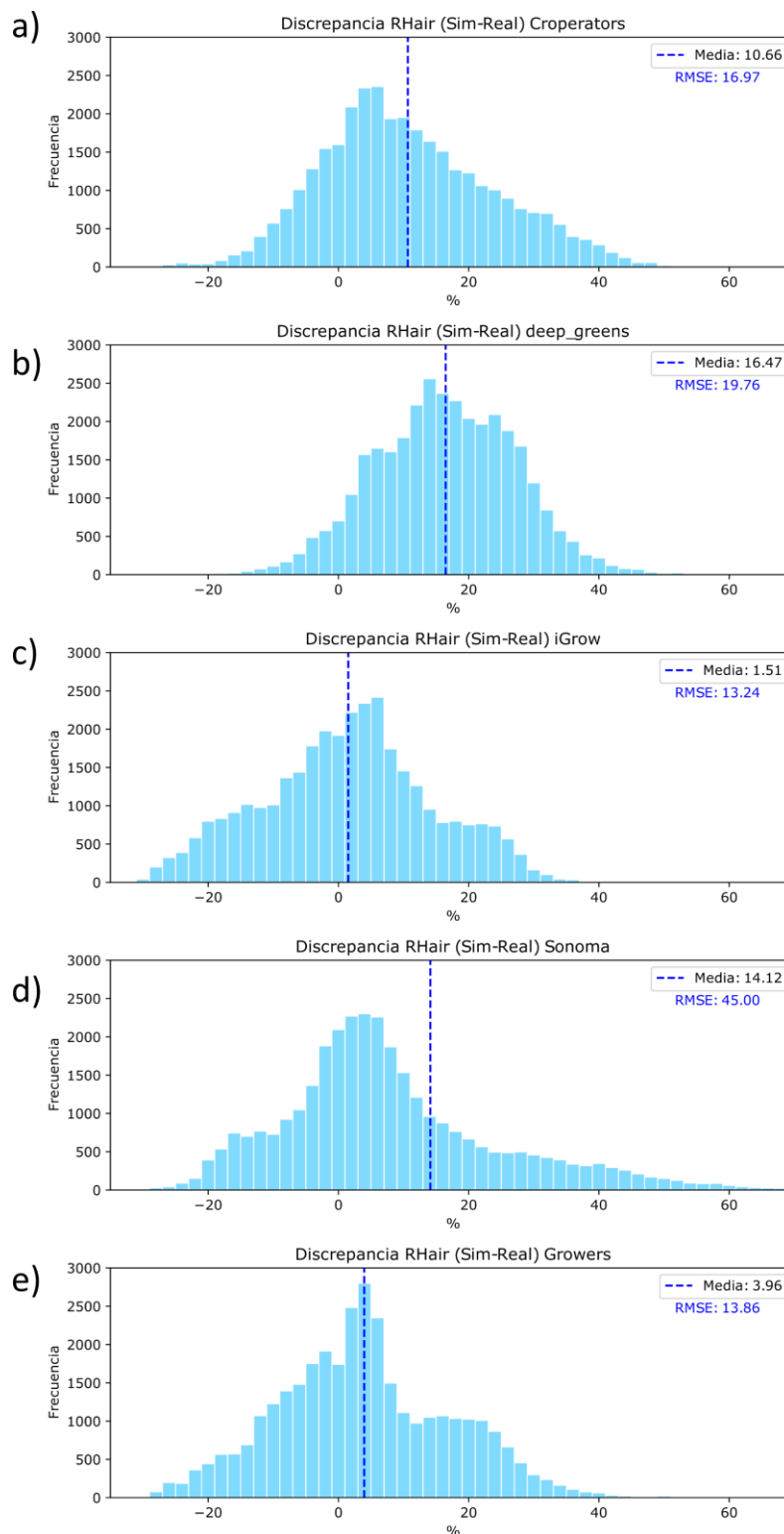


Figura 22. Gráficas de discrepancia del porcentaje de humedad relativa en el aire (RHair) Cada una de las gráficas pertenece a uno de los equipos participantes en el Autonomous Greenhouse Challenge; Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers. El histograma grafica la diferencia de los valores simulados y los reales. La línea vertical azul muestra el valor de la media. La mayoría de la humedad relativa del aire está sobrestimada. iGrow (22c) es el equipo menos sobrestimado con una media de 1.5, mientras que Deep\_greens (22b) es el más sobrestimado con una media de 16.47.

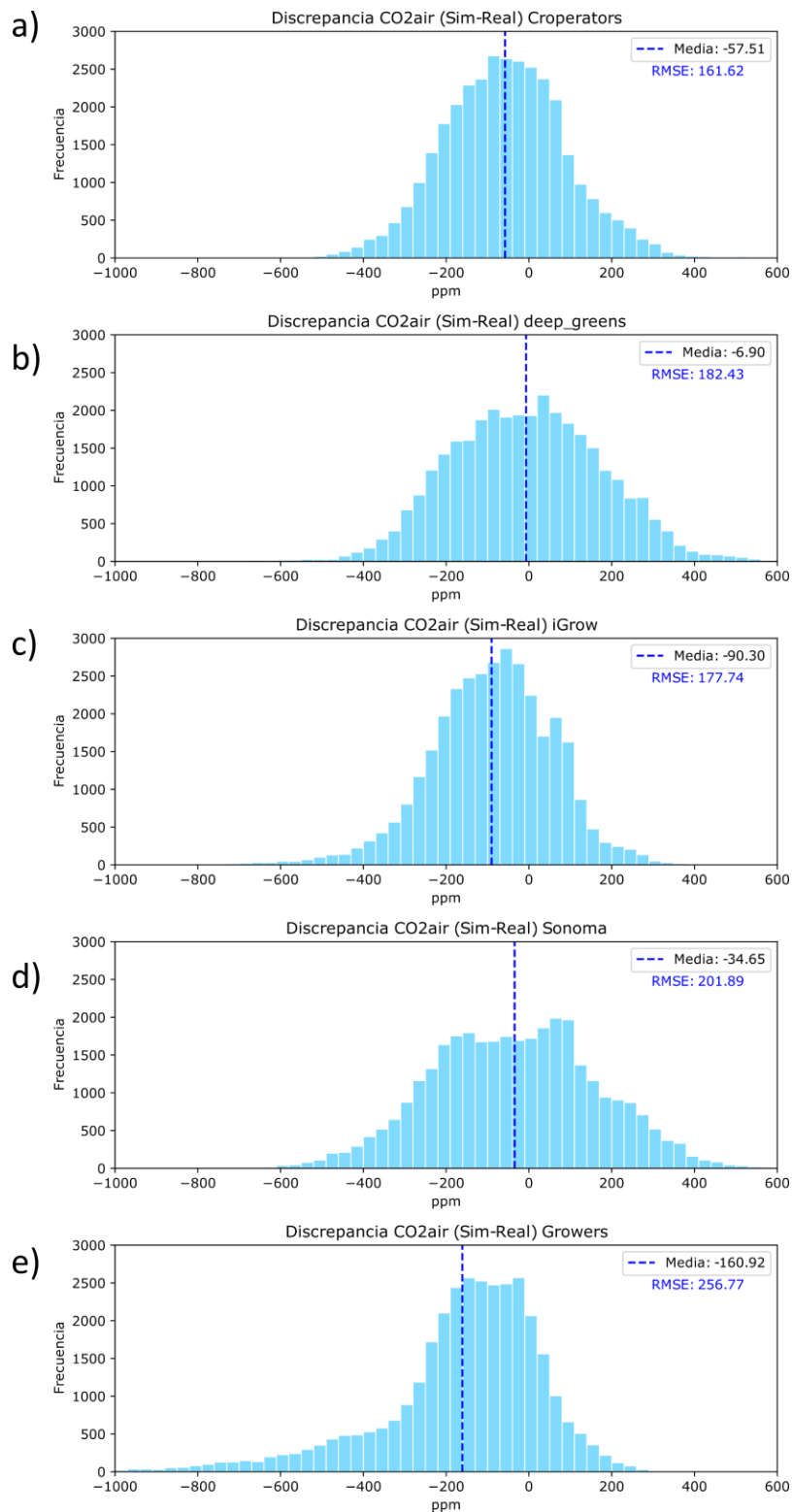


Figura 23. Gráficas de discrepancia de las partes por millón (ppm) de CO<sub>2</sub> en el aire (CO<sub>2</sub> air) Cada una de las gráficas pertenece a uno de los equipos participantes en el Autonomous Greenhouse Challenge; Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers. El histograma grafica la diferencia de los valores simulados y los reales. La línea vertical azul muestra el valor de la media. La mayoría del CO<sub>2</sub> en el aire se encuentra subestimado. Deep\_greens (23b) es el equipo menos subestimado con una media de -6.90, mientras que Growers (23e) es el más subestimado con una media de -160.92.



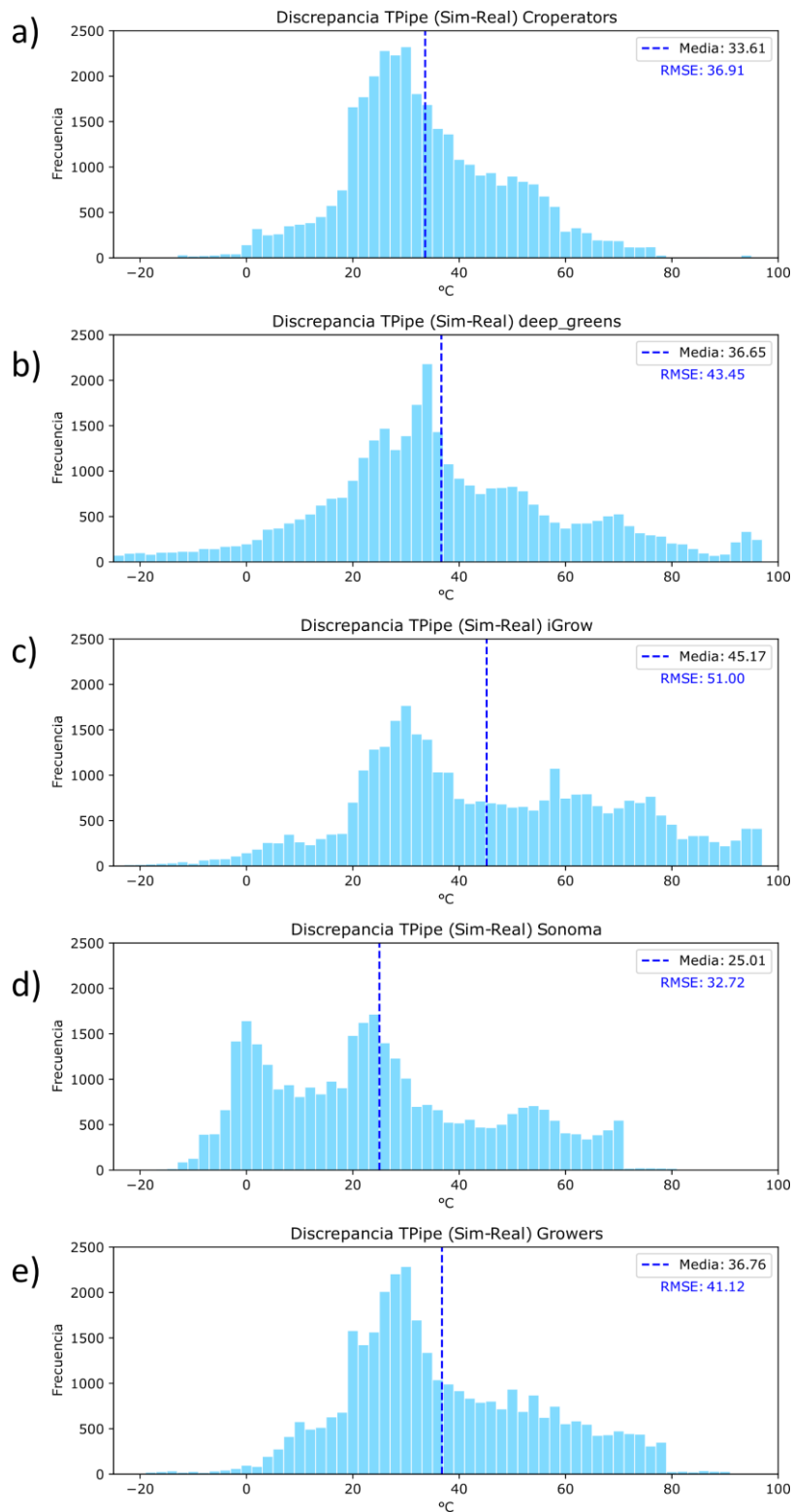


Figura 24. Gráficas de discrepancia de la temperatura de las tuberías (TPipe)

Cada una de las gráficas pertenece a uno de los equipos participantes en el Autonomous Greenhouse Challenge; Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers. El histograma grafica la diferencia de los valores simulados y los reales. La línea vertical azul muestra el valor de la media. La mayoría de la temperatura de la tubería se encuentra sobreestimada. El equipo más sobreestimado es iGrow (24c) con la media de 45.17.

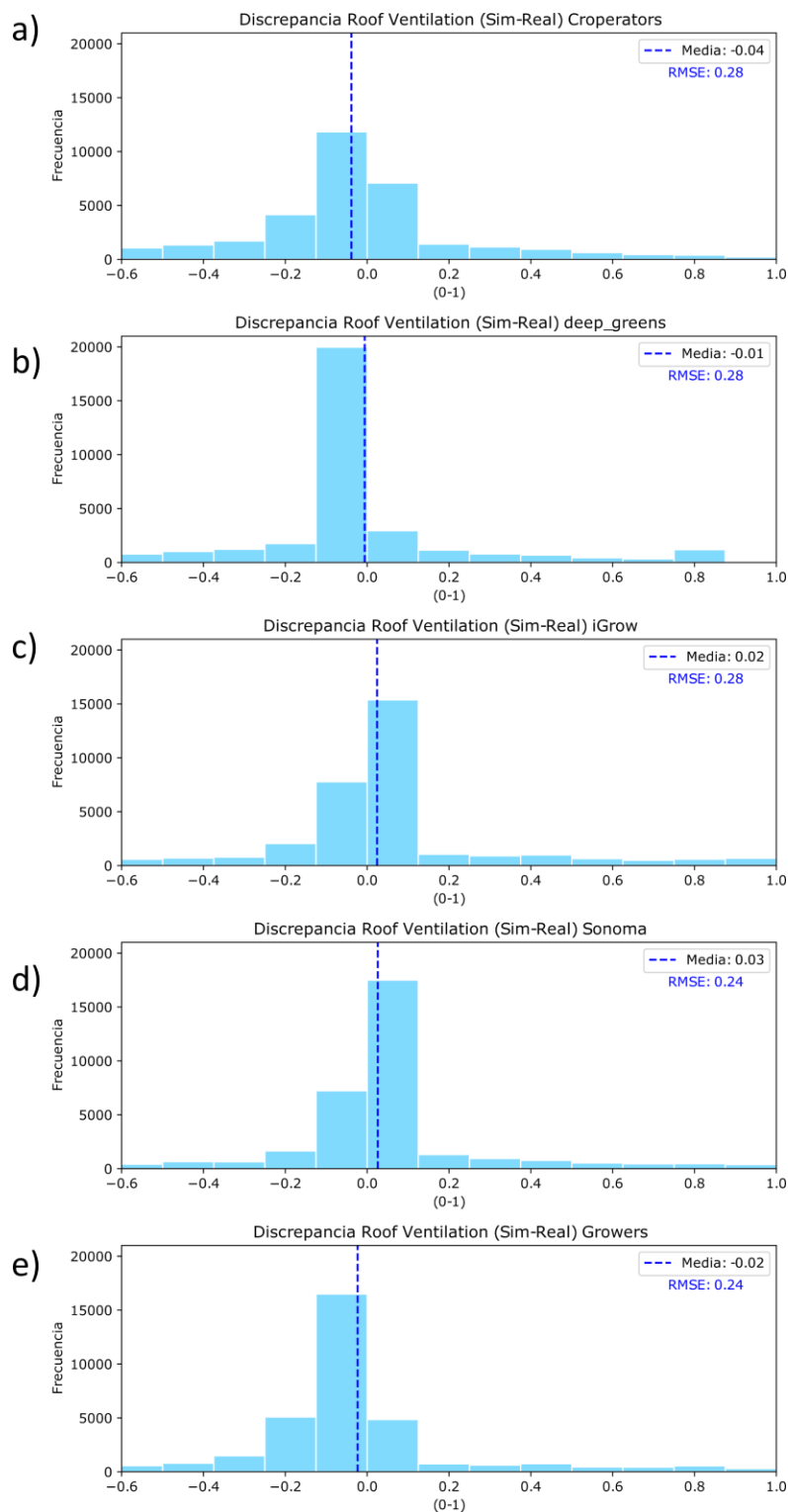


Figura 25. Gráficas de discrepancia del Control de Ventilación del Techo (Roof Ventilation Control). La ventilación del techo del invernadero estará completamente cerrada si los valores son 0, mientras que por el contrario estará completamente abierta si los valores son 1. Cada una de las gráficas pertenece a uno de los equipos participantes en el Autonomous Greenhouse Challenge; Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers. El histograma grafica la diferencia de los valores simulados y los reales. La línea vertical azul muestra el valor de la media. La ventilación del techo en general tiene un valor de media muy cercano a cero para todos los equipos.

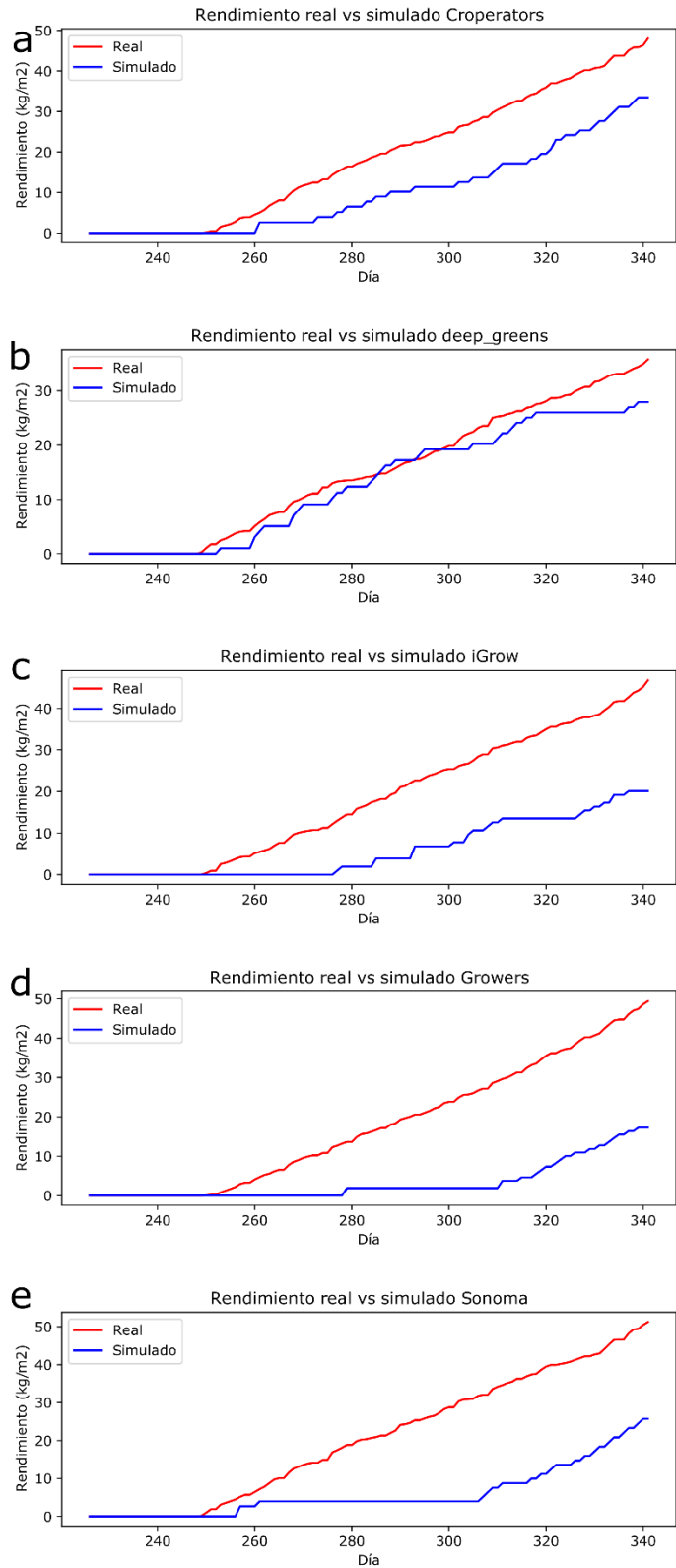


Figura 26. Gráficas de comparación del rendimiento simulado y real

Se muestra la producción en el Autonomous Greenhouse Challenge (rojo) y el rendimiento producido durante toda la simulación (azul). Los días están enumerados de acuerdo con el día del año. Cada una de las gráficas pertenece a uno de los equipos participantes en el

Autonomous Greenhouse Challenge; Croperators, Deep\_greens, iGrow, Sonoma y Growers. Tanto Deep\_greens (26b) como Croperators (26a) son los equipos mejor representados en cuanto al rendimiento de pepino.

## Discusión

El sistema de almacenamiento de datos en formato TDMS es capaz de guardar la inmensa cantidad de datos generada durante una temporada de cultivo simulada. Esto soluciona el problema de la pérdida de datos que ocurría con anterioridad al utilizar G-Sim, ya que el modelo únicamente mostraba ciertos datos en tiempo real. Sin embargo, los datos se perdían una vez que finalizaba la simulación. Actualmente, las simulaciones con las que se trabajaron en este proyecto generaron una base de datos que contiene 4.89 millones de datos por experimento de simulación, lo cual representa una gran cantidad de información que podría utilizarse para mejorar la toma de decisiones en un cultivo en invernadero para hacerle frente a las adversidades que podrían presentarse durante la temporada. Un manejo del cultivo a través de un modelo de invernadero ayudaría a la optimización de procesos, por lo que se produciría más producto con menos recursos. Esto es sumamente útil para regiones donde la eficiencia es bastante importante, es decir, donde los recursos son demasiado limitados y se requiere una producción alta o también para aquellas regiones donde las condiciones climáticas son demasiado adversas y el cultivo en sistemas protegidos debe priorizarse ante el cultivo a cielo abierto.

Asimismo, las simulaciones abarcan el periodo del 14 de agosto del 2018 a las 12h al 7 de diciembre del 2018 a la 1h; donde la entrada de datos climáticos ocurría cada cinco minutos. Cabe mencionar que el espacio de almacenamiento al utilizar un archivo TDMS es reducido (National Instruments, 2023a), ya que para una simulación con las características utilizadas para este proyecto únicamente consumió alrededor de 200MB por archivo/simulación. Esta cantidad es un tamaño reducido en comparación con la cantidad de datos obtenida previamente mencionada. Además, la velocidad de escritura y lectura de los archivos TDMS permite que durante la simulación se estén escribiendo una gran cantidad de datos a la vez y que la consulta de los datos sea rápida (National Instruments, 2023a). Esto es importante debido a que el solucionador de ecuaciones diferenciales requiere casi la totalidad del CPU mientras se corre una simulación.

Por otra parte, con las nuevas opciones añadidas a la interfaz gráfica G-Sim se ha readaptado a un modo de operación semiautomática. Ahora, el proceso de personalizar constantes físicas, de invernadero y de cultivo a mano, previo a cada experimento de simulación, se reduce de varios minutos a un par de segundos que toma el seleccionar la ruta donde se ubica el archivo que contiene los valores a utilizar. Además, la operación semiautomática reduce el riesgo de cometer errores durante la escritura de los valores de cada constante. Sin esta característica, un error en las constantes habría provocado el reinicio de la simulación una vez que el usuario se percatara del error. Estas nuevas mejoras también abren la posibilidad a que los usuarios que se acerquen por primera vez a este tipo de tecnología tengan una interfaz gráfica más sencilla, intuitiva y fácil de manejar.

La nueva característica de cargar archivos .cvs permitió la interpretación de datos provenientes del *Autonomous Greenhouse Challenge* y será útil para simular otros experimentos realizados en un invernadero. Esta característica no es un caso aislado que solo servirá en este proyecto, sino que ahora G-Sim es capaz de interpretar otras bases de datos ya sean de futuras ediciones del *Autonomous Greenhouse Challenge* o de otros experimentos distintos y personalizados. Por ello, dicha característica aporta una mejora en la flexibilidad y adaptación del modelo para simular diferentes situaciones experimentales, dado que la infraestructura, materiales y equipo de un invernadero se encuentra en una gran variedad de diferentes condiciones y factores que buscan una correcta adecuación acorde a cada región del mundo (Van Henten et al., 2006; Vanthoor et al., 2011).

En cuanto al uso de bases de datos climáticas, el simulador de invernaderos puede ahora trabajar con datos climáticos provenientes de diferentes estaciones meteorológicas. En este proyecto se utilizó una base de datos climática proveniente de Bleiswijk, Países Bajos, ya que en esta región se realizó el *Autonomous Greenhouse Challenge*. Esta base de datos acotó la región climática, permitiendo una simulación más precisa de lo que habría sido al utilizar una base de datos climática proveniente de la ciudad poblacional más grande y cercana. Además, esta característica permite que el modelo se adapte a cualquier región del mundo que cuente con el registro de los datos climáticos necesarios, dado que el clima de la región donde se encuentra el invernadero influye completamente en la dinámica dentro del invernadero, influyendo en la manera que se operará el sistema (Baille, 1999; Vanthoor et al., 2011).

La discrepancia obtenida al comparar la simulación y los datos reales en general es cercana al cero en la mayoría de los casos. En la temperatura del aire y la mayoría de los datos de los equipos están subestimados, es decir la temperatura del aire simulada suele ser de 0°C a 5°C menor que la real. Esto indica que el simulador tiene algunos parámetros que podrían estar subestimados respecto a la realidad, como lo son aquellos que influyen directamente en las temperaturas del aire como lo es la presión de vapor del aire en el compartimiento superior, la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire del invernadero y en la parte superior o la tasa de flujo de aire a través de la pantalla térmica. Sin embargo, esto también podría estar influenciado por la ventilación del invernadero. Es posible que al mejorar las ganancias del algoritmo de PID del sistema de calefacción este parámetro mejore.

Respecto a la discrepancia observada en la humedad relativa, la discrepancia en general se encuentra cercana al valor cero, aunque con un gran rango de variación que va del -20% al 40%. Algunos factores posibles que podrían estar influyendo en la sobrestimación de la humedad relativa son la temperatura del aire y/o el sistema de nebulización. Por lo que nuevamente el algoritmo PID podría influir.

Para la discrepancia obtenida en el CO<sub>2</sub> en el aire se observó una tendencia a la subestimación. Dicha subestimación tiene un rango de -600ppm a 300ppm. Por lo que se podría

estar subestimando el flujo de vapor del sistema nebulizador al aire del invernadero, el mecanismo de ventilación natural, la apertura de las ventanas cuando es cero, y/o las aperturas del techo.

En el caso de la discrepancia obtenida para las temperaturas de la tubería, los datos se encuentran más desalineados. El algoritmo PID que controla la temperatura de las tuberías necesita una calibración más grande. Los valores de estas gráficas van de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo que se observa una mayor sobreestimación que subestimación. El principal factor que potencialmente afecta la simulación de la temperatura de las tuberías es el desconocimiento del algoritmo de control en el invernadero real. En G-SIM, se usan algoritmos PID para controlar la temperatura de la tubería en respuesta al control deseado de la temperatura del aire. Las ganancias del algoritmo PID necesitan calibración para simular mejor a esta variable.

Finalmente, la discrepancia observada en la ventilación del techo es la que menos diferencias tuvo respecto a las reales. Por ello es un poco complicado discernir si sus valores se encuentran subestimados o sobreestimados. Por lo que es posible que no se necesite una gran calibración de la ventilación.

## Conclusiones

El sistema modelo invernadero – cultivo (G-Sim) es capaz de almacenar los datos generados durante la simulación de una temporada de cultivo de pepino. Lo anterior a través de la implementación de un sistema de guardado de datos que utiliza archivos TDMS como medio de almacenamiento de la información de la simulación. Este sistema de guardado es eficiente debido a su reducido tamaño en el disco duro y a su alta velocidad tanto de escritura como de lectura.

Las simulaciones del modelo de invernadero – cultivo (G-Sim) resultan en una discrepancia cercana al cero. La ventilación del techo (Roof ventilation) muestra la menor discrepancia de las cinco variables de estado evaluadas. Mientras que la temperatura de las tuberías (TPipe) muestra la mayor discrepancia de los cinco análisis. Por lo que al calibrar el simulador deberá trabajarse especialmente con la temperatura de las tuberías, ya que los valores parecen ser muy variables. Lo anterior se observa en la forma de la curva del histograma siendo los experimentos que menos se asemejan a una campana de Gauss.

El rendimiento de pepino en una temporada simulada por el modelo invernadero – cultivo (G-Sim) es menor a lo esperado. De los cinco experimentos realizados dos (Croperators y Deep\_greens) fueron los mejores representados en cuanto a rendimiento acumulado. Sin embargo, solamente (Deep\_greens) fue casi fielmente representado durante toda la simulación.



## Perspectivas

Durante este trabajo se comenzó a programar la estructura principal para poder llevar a cabo el proceso de calibración del simulador G-Sim. Ahora lo siguiente es afinar la programación y llevar a cabo el proceso de calibración en sí. Para ello se deberá de utilizar, y en su caso complementar, la función de calibración dentro del código de G-Sim que se ha trabajado durante la tesis. Para ello se requerirá hacer uso de un algoritmo que ha sido previamente programado en LabVIEW™ un VI que lleva por nombre “Global Optimization”. Este programa utiliza un modelo matemático llamado “Differential evolution”, el cual tendrá la función de optimizar a G-Sim a través de un proceso de iteraciones donde se generarán posibles soluciones referentes al proceso de calibración. El proceso de iteraciones se encuentra en una constante evolución y mejora a medida que se completa cada iteración por lo que se espera que al final del proceso la calibración de G-Sim se haya completado. (Feoktistov, 2006; Georgioudakis & Plevris, 2020).

Dado a lo anterior el proceso de calibración deberá recaer en los algoritmos de PID y sobre todo haciendo énfasis en aquellos algoritmos PID que arrojaron valores de discrepancia más variados. Como, por ejemplo, comenzando con el algoritmo PID que se encarga del control de la calefacción y que a su vez impacta en los datos obtenidos para la temperatura de la tubería (Tpipe) que fue donde se generaron los valores con el rango más amplio en comparación con los demás. Una vez realizada la calibración, será necesario evaluar nuevamente qué tan adecuadamente representa la realidad el simulador ya calibrado a través de un proceso de validación.

Asimismo, al tener una simulación de este tipo calibrado podrá ayudar a la optimización del cultivo de pepino de invernadero. Donde se esperaría que se produzcan más pepinos, con menos recursos. Para los productores sería una gran ventaja debido a que el cultivo podría llevarse de manera más precisa evitando pérdidas relacionadas al exceso de utilización de los recursos con los que se controla tanto el cultivo como el clima del invernadero.

## Bibliografía

- Ahmed, M., Ahmad, S., Raza, M. A., Kumar, U., Ansar, M., Shah, G. A., Parsons, D., Hoogenboom, G., Palosuo, T., & Seidel, S. (2020). Models Calibration and Evaluation. En *Systems Modeling* (pp. 151–178). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4728-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4728-7_5)
- Albajes, R., Lodovica Gullino, M., Van Lenteren, J. C., & Elad, Y. (1999). *Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops* (Vol. 14). Developments in Plant Pathology.
- Atkinson, K., Han, W., & Stewart, D. (2009). *Numerical Solution of Differential Equations*. John Wiley & Sons, Inc. [https://homepage.divms.uiowa.edu/~atkinson/papers/NAODE\\_Book.pdf](https://homepage.divms.uiowa.edu/~atkinson/papers/NAODE_Book.pdf)
- Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 373). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753>
- Baille, A. (1999). Overview of greenhouse climate control in the Mediterranean regions. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 31, 59–16.
- Butcher, J. C. (John C. (2008). *Numerical methods for ordinary differential equations*. John Wiley & Sons Ltd. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470753767>
- Domis, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Greenhouse Tomato Fruit Quality. En J. Janick (Ed.), *Horticultural reviews* (Vol. 28, pp. 239–319). John Wiley & Sons.
- Feoktistov, V. (2006). Differential Evolution. En *Springer Optimization and Its Applications* (Vol. 5, pp. 1–24). Springer.
- Gary, C. (1999). Modeling Greenhouse crops: State of the art and perspectives. *Acta Horticulturae*, 495, 317–322.
- Georgioudakis, M., & Plevris, V. (2020). A Comparative Study of Differential Evolution Variants in Constrained Structural Optimization. *Frontiers in Built Environment*, 6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00102>
- Gruda, N. (2005). Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. En *Critical Reviews in Plant Sciences* (Vol. 24, Número 3, pp. 227–247). <https://doi.org/10.1080/07352680591008628>
- Heji, G., & Van Uffelen, J. A. M. (1984). Effects of CO<sub>2</sub> concentration on growth of glasshouse cucumber. *Symposium on CO<sub>2</sub> Enrichment*, 162, 29–36.

- Hemming, S., de Zwart, F., Elings, A., Righini, I., & Petropoulou, A. (2019). Remote Control of Greenhouse Vegetable Production with Artificial Intelligence—Greenhouse Climate, Irrigation, and Crop Production. *Sensors*, 19(8), 1807. <https://doi.org/10.3390/s19081807>
- Hills, R. G. (2006). Model Validation: Model Parameter and Measurement Uncertainty. *Journal of Heat Transfer*, 128(4), 339–351. <https://doi.org/10.1115/1.2164849>
- Ince, E. L. (1956). *Ordinary differential equations* (Courier Corporation, Ed.). Dover Publications, Inc.
- K.N. Tiwari, D. T. S., Singh, V. K., & Reddy, A. R. G. (2017). Micro Climate Control in Greenhouse. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(3), 1730–1742. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.603.199>
- Makowski, D., Wallach, D., Andrieu, B., Jeuffroy, M.-H., Jones, J. W., Makowski, D., Hillier, J., Wallach, D., Andrieu, B., & Jeuffroy, M.-H. (2006). *Parameter estimation for crop models Working with Dynamic Crop Models Edited by Chapter 4 Parameter estimation for crop models*. <https://www.researchgate.net/publication/233858512>
- Manrique, L. A. (1993). Greenhouse crops: A review. En *Journal of Plant Nutrition* (Vol. 16, Número 12, pp. 2411–2477). <https://doi.org/10.1080/01904169309364697>
- Marcelis, L. F. M. (1994). A Simulation Model for Dry Matter Partitioning in Cucumber. *Annals of Botany*, 74(1), 43–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/aob/74.1.43>
- Nagarajan, M., Senthilvel, S., & Palanysamy, D. (2002). Material substitution in greenhouse construction. *Kisan World*, 11, 57–58.
- National Instruments. (2022a, mayo 27). *Arquitectura de productor/consumidor en LabVIEW*. LabVIEW Support. <https://www.ni.com/es-mx/support/documentation/supplemental/21/producer-consumer-architecture-in-labview0.html#:~:text=El%20patr%C3%B3n%20de%20dise%C3%B1o%20productor,consumen%20datos%20a%20diferentes%20velocidades>.
- National Instruments. (2022b, septiembre 21). *Estructura interna del formato de archivo TDMS*. LabVIEW Support.
- National Instruments. (2023a, marzo 29). *NI TDMS File Format - What is a TDMS File?* LabVIEW Support. <https://www.ni.com/es-mx/support/documentation/supplemental/06/the-ni-tdms-file-format.html>
- National Instruments. (2023b, junio 9). *LabVIEW User Manual*. National Instruments: Documentation.
- National Instruments. (2023c, julio 27). *Escribiendo archivos TDM y TDMS en LabVIEW*. National Instruments: Documentation.

- Peet, M. M., & Willits, D. H. (1987). Greenhouse CO<sub>2</sub> enrichment alternatives: effects of increasing concentration or duration of enrichment on cucumber yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 112(2), 236–241.
- Pérez Guerrero, U. G. (2021). *G-Sim: modelo virtual de invernadero-cultivo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000806522](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000806522)
- Rabbi, B., Chen, Z. H., & Sethuvenkatraman, S. (2019). Protected cropping in warm climates: A review of humidity control and cooling methods. En *Energies* (Vol. 12, Número 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12142737>
- Reddy, P. P. (2016). Protected Cultivation. *Sustainable Crop Protection under Protected Cultivation*, 1–11. [https://doi.org/10.1007/978-981-287-952-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-287-952-3_1)
- Rezvani, S. M. E. D., Shamshiri, R. R., Hameed, I. A., Abyane, H. Z., Godarzi, M., Momeni, D., & Balasundram, S. K. (2021). Greenhouse crop simulation models and microclimate control systems, a review. En R. R. Shamshiri (Ed.), *Next-Generation Greenhouses for Food Security* (pp. 109–130). IntechOpen.
- Roberts, C. (2010). *Ordinary Differential Equations: Applications, Models and Computing* (1a ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b15111>
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., & Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth* (M. J. Grimble & M. A. Johnson, Eds.). Springer International Publishing.
- Van Der Vlugt, J. L. F. (1983a). GROWTH AND ABORTION OF FLOWER BUDS IN GYNOECIOUS CUCUMBER PLANTS IN RELATION TO TEMPERATURE. En *Scientia Horticulturae* (Vol. 20).
- Van Der Vlugt, J. L. F. (1983b). THE EFFECT OF TEMPERATURE ON FORMATION AND ABORTION OF FLOWER BUDS IN GYNOECIOUS CUCUMBER PLANTS. En *Scientia Horticulturae* (Vol. 20).
- Van Henten, E. J., Bakker, J. C., Marcelis, L. F. M., Van 't Ooster, A., Dekker, E., Stanghellini, C., Vanthoor, B., Randerat, B. Van, & Westra, J. (2006). *The Adaptive Greenhouse-an Integrated Systems Approach to Developing Protected Cultivation Systems*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.718.46>
- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., Van Henten, E. J., & De Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, 110(4). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>

# Anexos

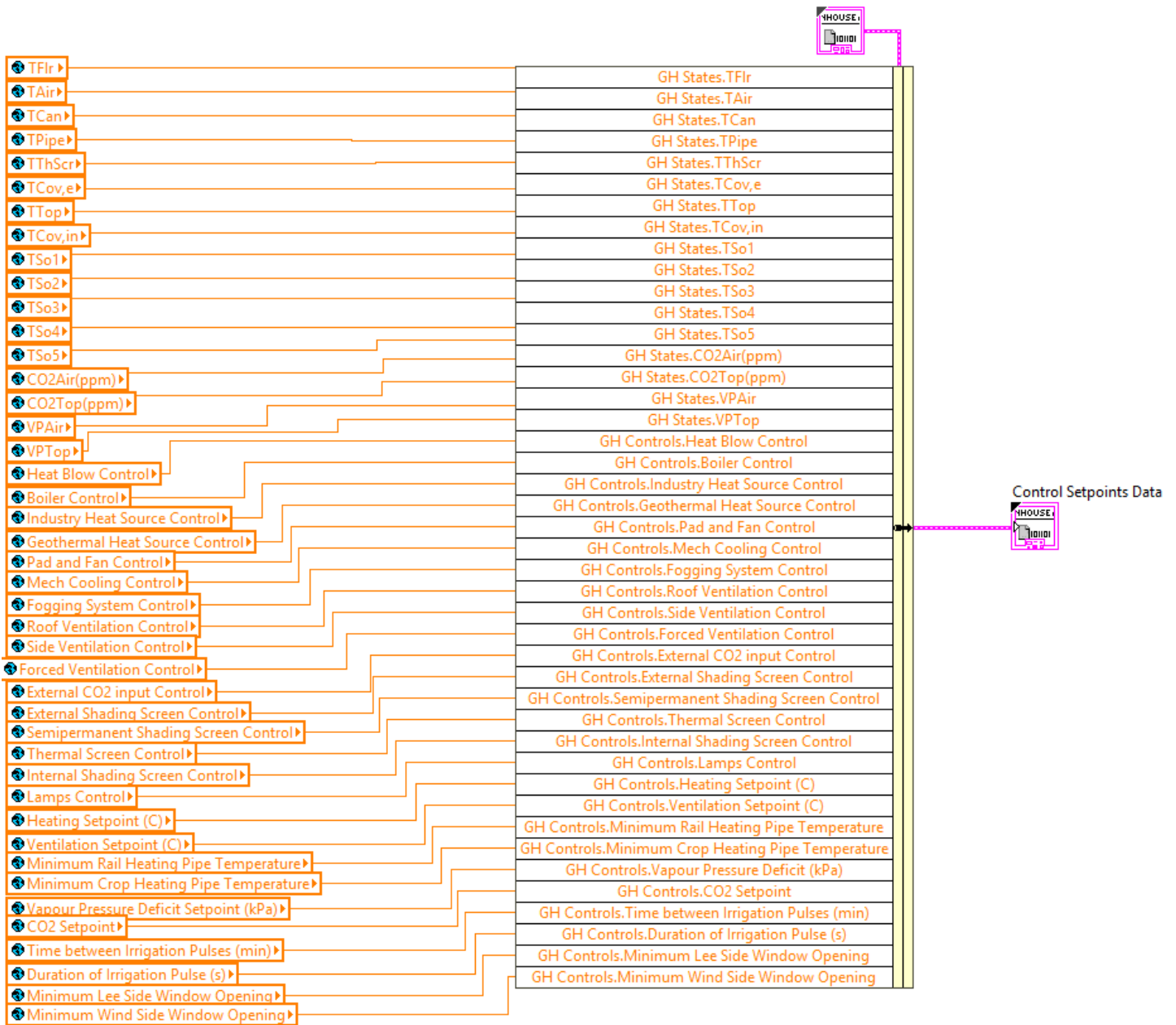


Figura suplementaria 1. VI programado en LabView2018TM para convertir variables globales en variantes.

Este proceso permite el transporte de los valores de cada variable hacia el loop del almacenamiento.

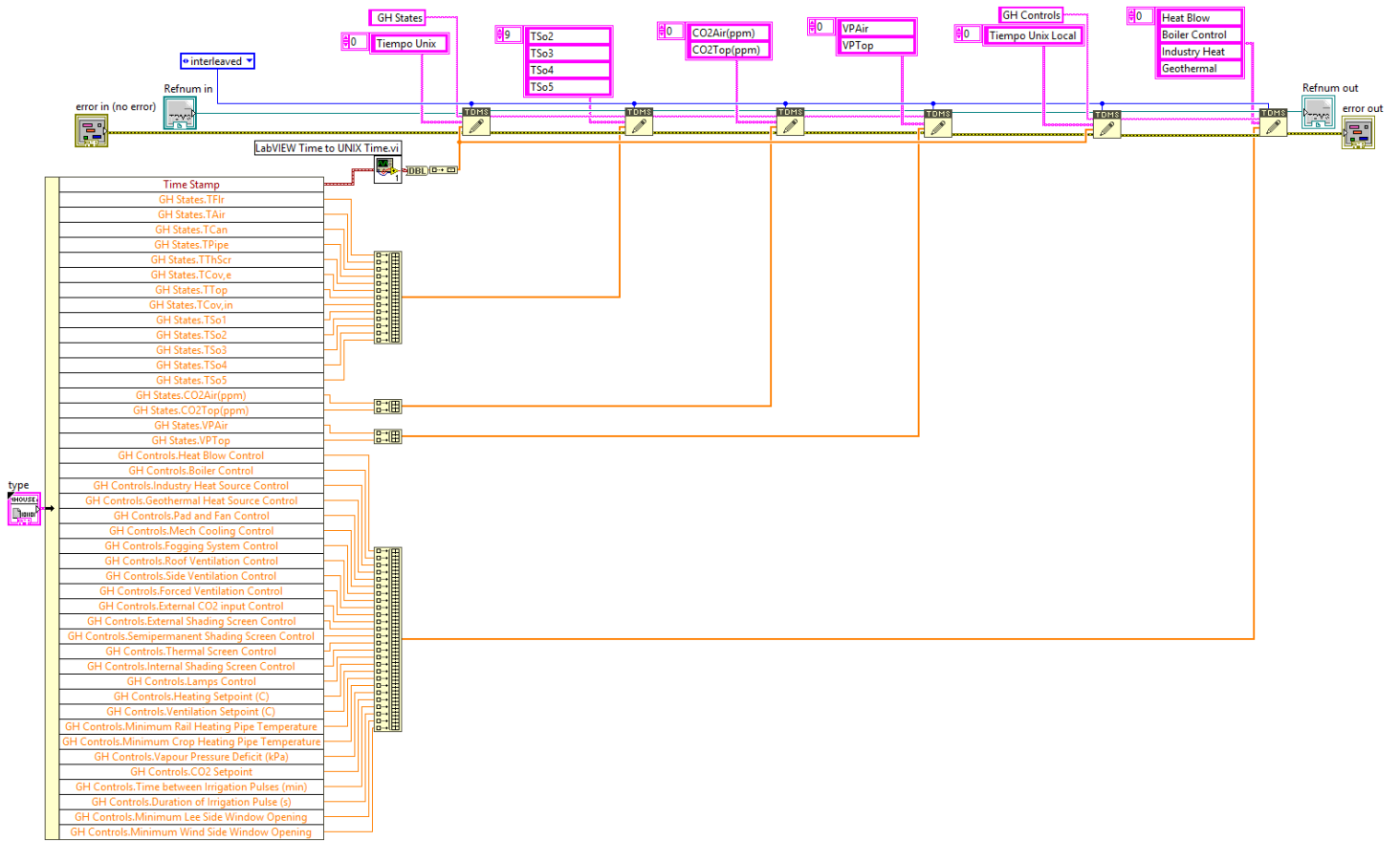


Figura suplementaria 2. VI programado en LabView2018™ para escribir y clasificar los valores de las variables globales dentro del archivo TDMS

Este proceso permite la agrupación correcta y ordenada de cada uno de los valores que se escribirán en el archivo TDMS.