



# Síntesis de un controlador óptimo y seguro para termas solares domésticas

**Richard Valentín Yantas Alcántara**

**Orientador: Dr / Marco Muñiz**

**Jurado:**

Dr. David Menotti – Universidade Federal do Paraná – Brasil  
Dr. Juan Carlos Gutierrez – Universidad Católica San Pablo – Perú  
Dr. Erick Gomez Nieto – Universidade de Sao Paulo – Brasil  
Dr. Alex Cuadros Vargas – Universidad Católica San Pablo – Perú

*Tesis presentada al  
Departamento de Ciencia de la Computación  
como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencia de la Computación.*

**Universidad Católica San Pablo – UCSP  
Octubre de 2018 – Arequipa – Perú**



*Dedico este trabajo a todas las personas  
que con mucho entusiasmo me brinda-  
ron su apoyo día tras día para llevar  
acabo esta obra.*



# Abreviaturas

**SWH** *Solar Water Heating*

**CS** *Controller Synthesis*

**SHSS** *Stochastic Hybrid Switched Systems*

**HVAC** *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

**SENAMHI** *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*



# Agradecimientos

---

Deseo agradecer de corazón: A mis padres por creer que puedo lograrlo todo. A mi hermano por mantener siempre una sonrisa, aun cuando los tiempos son difíciles. A mis maestros, especialmente a mi asesor por la paciencia y la fé depositada en mí. A mis amigos por caminar siempre a mi lado y nunca abandonarme.

Deseo agradecer de manera especial al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico e Innovación Tecnológica (FONDECYT-CIENCIACTIVA), que mediante Convenio de Gestión 234-2015-FONDECYT, han permitido la subvención y financiamiento de mis estudios de Maestría en Ciencia de la Computación en la Universidad Católica San Pablo (UCSP). Agradezco de forma muy especial a mi orientador Dr. Marco Muñoz por haberme guiado en esta tesis.





# Abstract

---

Cyberphysical systems have recently gained prominence in many applications developed today. In the present work, is used a methodology whose purpose is to optimize at the energy level supplied to *Solar Hot Water* for domestic uses.

In the system studied, is proposed to optimize the energy resource, considering that the volume to be heated can be estimated probabilistically based on a historial uses, to be possible this describes multiple scenarios in which controllables and uncontrollables modes are involved., the last will be explained in more detail in this document.

The proposed approach proposes a series of stages such as: Modeling of the physical system, Stabilization criteria for a safe and optimal control, emph Synthesize a controller that limits or controls the behavior of the system usually called plant, to comply with the specifications .

**Keywords:** Model Checking, Machine Learning, Game theory.



# Resumen

---

Los sistemas ciberfísicos últimamente han ganado protagonismo en mucha de las aplicaciones desarrollados en la actualidad. En el presente trabajo se hace la presentación del uso de una metodología cuyo propósito es la de optimizar a nivel energetico el uso diario de las termas solares de uso domestico.

En el sistema estudiado se plantea optimizar el recurso energético, considerando que el volumen a calentar pueda ser estimado de forma probabilistica en función a un historial continuo de uso, para ser posible esto se describe multiples escenarios en las cuales estan involucradas modos controlables y modos no controlables que serán explicadas con mas detalle en el presente documento.

El enfoque propuesto plantea una serie de etapas tales como: Modelamiento del sistema fisico, Criterios de estabilización para un control seguro y optimo, *Sintetizar* un controlador que limita o controla el comportamiento del sistema usualmente llamado planta, para cumplir con la especificaciones.

**Palabras clave:** Verificación de Modelos, Aprendizaje Automatico, Teoría de juegos.



# Índice general

Índice de tablas	XV
Índice de figuras	XVII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y Contexto . . . . .	1
1.2. El Problema . . . . .	1
1.3. Propuesta . . . . .	2
1.4. Objetivos y Aportes . . . . .	3
<b>2. Trabajos Relacionados</b>	<b>5</b>
2.0.1. Sistemas de Control conmutado . . . . .	5
2.1. Sintesis de Controladores . . . . .	6
2.2. Seguridad y alcanzabilidad en el Control . . . . .	6
<b>3. Nombre del Capítulo</b>	<b>9</b>
3.1. Sección 1 del Capítulo . . . . .	9
3.1.1. Sub Sección . . . . .	9
3.2. Consideraciones Finales . . . . .	9
<b>4. Propuesta</b>	<b>11</b>
<b>5. Pruebas y Resultados</b>	<b>13</b>

<b>6. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>15</b>
6.1. Limitaciones . . . . .	15
6.2. Recomendaciones . . . . .	15
6.3. Trabajos futuros . . . . .	15
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>

# Índice de cuadros





# Índice de figuras

1.1. Esquema del termosifón . . . . .	2
2.1. Esquema de un sistema conmutado . . . . .	5

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y Contexto

En la actualidad internet de las cosas esta teniendo un gran impacto en la sociedad tanto en control como en obtención de data, como consecuencia los sistemas ciberfísicos como un campo que permite estudiar algoritmos que permitan interactuar con sistemas físicos, promete mucho dentro de aplicaciones en ingeniería. Construir edificios mas eficientes energéticamente, asi como mantener el confort termico ha sido una importante tarea en las últimas décadas, incluyendo mejorar la eficiencia en sistemas *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC). Un enfoque a este objetivo es usar de una forma adecuada los metodos de control, en la literatura se puede apreciar las mas comunmente usadas como: control clasico, control predictivo basado en modelos y control inteligente. [Belic et al. \(2015\)](#)

Termosifon, calentadores solares de agua en general, han sido ampliamente usados en lugares de bajas temperaturas. Mucho de los diseños del termosifon han sido desarrollados por prueba y error. Han habido muchas formas de estudio analiticas y numericos para poder mejorar su eficiencia. [Morrison y Braun \(1985\)](#)

### 1.2. El Problema

Un sistema dinámico en particular *Solar Water Heating* (SWH) usados ampliamente en los hogares para múltiples usos dentro los principales estan: el aseo personal y limpieza de objetos del hogar. En la actualidad se cuentan con varios métodos que buscan optimizar a nivel energético el SWH, sin embargo ninguna propone una optimización basada en *Controller Synthesis* (CS), la cual propone el uso de la teoría de automatas temporizados, que busca optimizar a nivel de estados un sistema.

### 1.3. Propuesta

En los sistemas *Stochastic Hybrid Switched Systems* (SHSS) se puede apreciar un conjunto de estados que separan por un tiempo pequeño, por la cual puede ser modelado como un *timed automata*, como consecuencia se puede emplear metodos de optimización de *model checking*.

Para nuestro estudio realizamos algunas consideraciones para la simplificacion del modelo fisico:

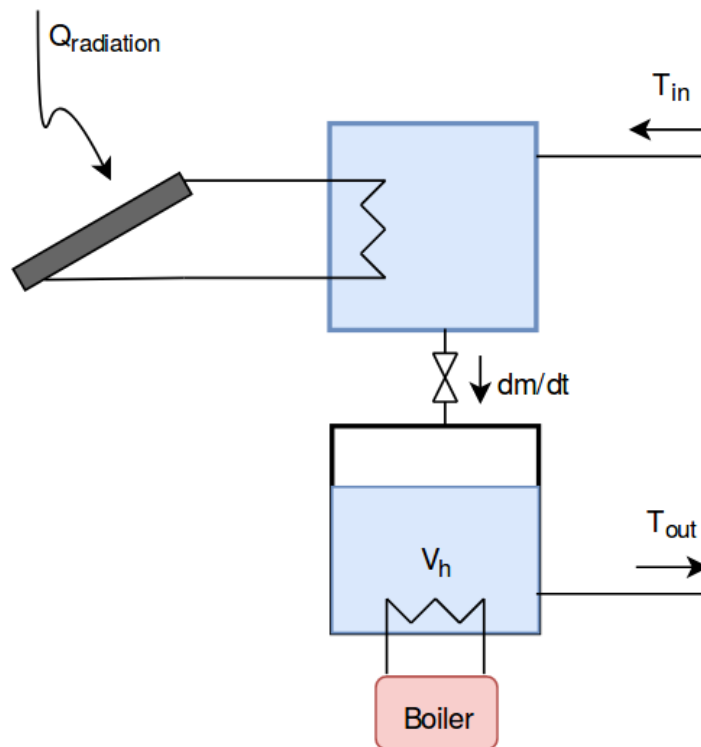


Figura 1.1: Esquema del termosifón

- Terma solar pasivo ó tambien llamado termosifón.
- El indice de radiación es tomado de un historial de medición ubicada en la ciudad de Arequipa, obtenida del *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú* (SENAMHI).
- Fluido incomprensible.
- Turbulencias minimas dentro del contenedor.
- flujo constante del fluido.
- Contenedor auxiliar de volumen variable.
- Membrana porosa en el contenedor auxiliar para atenuar la presion negativa.

## 1.4. Objetivos y Aportes

- Comparar el rendimiento energético del *SWH* tradicional de uso común con el rendimiento obtenido empleando nuestra metodología.
- Plantear un control seguro y estable para el *SWH*.



# Capítulo 2

## Trabajos Relacionados

### 2.0.1. Sistemas de Control conmutado

En los últimos años, los sistemas de control conmutado han tomado mucha atención en la comunidad de sistemas de control, dado que se tiene buenos resultados para sistemas híbridos, por ende los sistemas lineales conmutables puede ser considerado un clase que pertenece a los sistemas de control híbrido. Además este tipo de sistemas pueden ser usados para modelar sistemas sujetos a una conocida o desconocida variación repentina de parametros como por ejemplo los sistemas lineales conmutables sincrónicos. [Lin y Antsaklis \(2009\)](#) En la parte de abajo se muestra un esquema que detalle como se comporta.

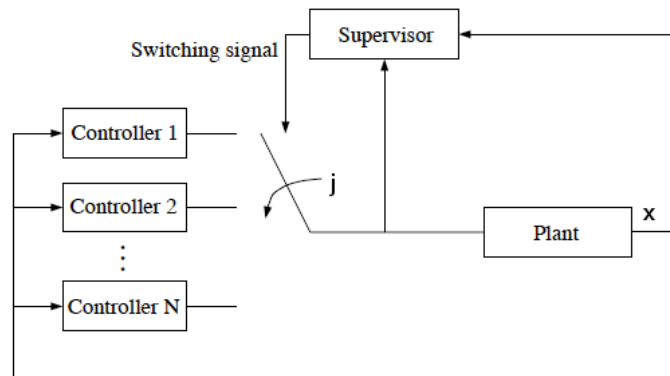


Figura 2.1: Esquema de un sistema conmutado

En el presente trabajo, nos enfocaremos en un tipo de sistemas conmutables discretos, considerando que la conmutación ocurre de forma periódica con un período de conmutación definido por  $\tau$ . Considerando que un actuador físico no cuenta con un tiempo de respuesta inmediata, es prudente tomar en consideración, un periodo fijo

en que el actuador pueda cambiar de un estado a otro. Este tipo de sistemas se solía adaptar a escenas numéricas, con el objetivo de sintetizar el control.

## 2.1. Síntesis de Controladores

En esta sección se muestra que dado un autómata temporizado, restringido por una relación de transición de manera sistemática de tal modo que toda las características restantes satisfagan ciertas propiedades, como una extensión del problema de síntesis de control para eventos de un sistema dinámico discreto, donde además de elegir entre acciones, el controlador tiene la opción de no hacer nada dejando que el tiempo pase. El problema es abordado empleando nociones de juegos en tiempo real, para luego obtener un estrategia ganadora como un punto fijo del operador de espacio de estados y configuraciones del reloj. [Asarin et al. \(1998\)](#)

## 2.2. Seguridad y alcanzabilidad en el Control

En esta parte se presenta un método basado en corrección por diseño de un síntesis de control de estados dependientes para sistemas de conmutación lineal discretos en el tiempo. El método consiste en que dado un región objetivo  $R$  de espacio de estados, el método construye un conjunto  $S$  y un control que conduce cualquier elemento de  $S$  a  $R$ . El método funciona de forma iterativa hacia atrás para la accesibilidad de la region  $R$ . El metodo también puede ser usado para sintetizar un control de estabilidad que se mantiene indefinidamente dentro de  $R$ , todos los estados empiezan en  $R$ . [Le Coënt et al. \(2016\)](#)

**Problema 1** ( $(R, S)$  - Problema de Estabilidad). Dado un sistema conmutable de la forma que se muestra en el diagrama anterior, un conjunto de recurrencia  $R \subset \mathbb{R}^n$  y un conjunto seguro  $S \subset \mathbb{R}^n$ , encontrar un regla de control  $\sigma : \mathbb{R}^+ \rightarrow U$  tal que, para cualquier condicion inicial  $x_0 \in R_1$  y cualquier perturbación  $\varpi : \mathbb{R}^+ \rightarrow U$  de tal modo que:

- Recurrencia en  $R$ : existe una secuencia de incrementos estrictamente monotonos de enteros positivos  $k_t, t \in \mathbb{N}$  tal que para todos los  $t \in \mathbb{R}^+, \phi(k_t; t_0, x^0, \sigma, w) \in R$
- Estabilidad en  $S$ : Para todos los  $t \in \mathbb{R}^+, \phi(t; t_0, x^0, \sigma, w) \in S$

**Problema 2** ( $(R_1, R_2, S)$  - Problema de Estabilidad). Dado un sistema conmutable de la forma que se muestra en el diagrama anterior, dos conjuntos  $R_1 \subset \mathbb{R}^n$  y  $R_2 \subset \mathbb{R}^n$  y un conjunto seguro  $S \subset \mathbb{R}^n$ , encontrar un regla de control  $\sigma : \mathbb{R}^+ \rightarrow U$  tal que, para cualquier condicion inicial  $x_0 \in R_1$  y cualquier perturbación  $\varpi : \mathbb{R}^+ \rightarrow U$  de tal modo que:

- *Alcanzabilidad de  $R_1 a R_2$ : existe un entero positivo  $k \in \mathbb{N}$  tal que para todos los  $t \in \mathbb{R}^n$ ,  $\phi(k; t_0, x^0, \sigma, w) \in \mathbb{R}$*
- *Estabilidad en  $S$ : Para todos los  $t \in \mathbb{R}^n$ ,  $\phi(t; t_0, x^0, \sigma, w) \in S$*





# Capítulo 3

## Nombre del Capítulo

Cada capítulo deberá contener una breve introducción que describe en forma rápida el contenido del mismo. En este capítulo va el marco teórico. (pueden ser dos capítulos de marco teórico)

### 3.1. Sección 1 del Capítulo

Un capítulo puede contener n secciones. La referencia bibliográfica se hace de la siguiente manera: [Mateos et al. \(2000\)](#)

[Kratz y Nishino \(2009\)](#)

#### 3.1.1. Sub Sección

Una sección puede contener n sub secciones. ([Galante, 2001](#))

##### 3.1.1.1. Sub sub sección

Una sub sección puede contener n sub sub secciones.

### 3.2. Consideraciones Finales

Cada capítulo excepto el primero debe contener al finalizarlo una sección de consideraciones que enlacen el presente capítulo con el siguiente.



# Capítulo 4

## Propuesta

En este capítulo se desarrolla toda la propuesta realizada a través de la investigación. Sigue la misma estructura del capítulo anterior.

El título del capítulo es flexible de acuerdo a cada tesis. Algunos títulos sugeridos podrían ser:

- El algoritmo X: nuestra propuesta.
- La técnica Y

Este título debe de estar de acuerdo con el asesor del tema. Consúltelo en su sala de clase.



## Capítulo 5

### Pruebas y Resultados



# Capítulo 6

## Conclusiones y Trabajos Futuros

Las conclusiones de la tesis son una parte muy importante y tiene las siguientes partes.

En primer lugar debes escribir las conclusiones generales de tu trabajo. evita escribirlas en forma de viñetas. Simplemente utiliza texto continuo.

### 6.1. Limitaciones

La segunda parte de este capítulo corresponde a las limitaciones que tiene la propuesta. Esta seccion es muy importante para que los siguientes estudiantes que hagan algo en esta línea no cometan los mismos errores y tu tesis sea un buen peldaño para avanzar más rápido.

### 6.2. Recomendaciones

En esta sección el tesista debe reflejar que la tesis ha permitido adquirir nuevos conocimientos que podrían servir para guiar otros trabajos en el futuro.

### 6.3. Trabajos futuros

En base a los puntos anteriores es recomendable que tu tesis también sugiera trabajos futuros. Esta sección es esecialmente útil para otras ideas de tesis.

Todo este capítulo no debe ser más de 4 páginas.





# Bibliografía

- Asarin, E., Maler, O., et al. (1998). Controller synthesis for timed automata1. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(18):447–452.
- Belic, F., Hocenski, Z., et al. (2015). Hvac control methods-a review. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2015 19th International Conference on*, pages 679–686. IEEE.
- Galante, R. d. M. (2001). *Evolução de Esquemas em Bancos de Dados Orientados a Objetos com o emprego de versões*. PhD thesis, Instituto de Informática-UFRGS.
- Kratz, L. y Nishino, K. (2009). Anomaly detection in extremely crowded scenes using spatio-temporal motion pattern models. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*, pages 1446–1453. IEEE.
- Le Coënt, A., Fribourg, L., et al. (2016). Distributed synthesis of state-dependent switching control. In *International Workshop on Reachability Problems*, pages 119–133. Springer.
- Lin, H. y Antsaklis, P. J. (2009). Stability and stabilizability of switched linear systems: a survey of recent results. *IEEE Transactions on Automatic control*, 54(2):308–322.
- Mateos, G., García M., J., et al. (2000). Inclusión de vistas en ODMG. *Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD 2000)*, pages 383–395.
- Morrison, G. y Braun, J. (1985). System modeling and operation characteristics of thermosyphon solar water heaters. *Solar Energy*, 34(4-5):389–405.