



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA DE UN GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE VAPOR PARA APLICACIONES TÉRMICAS

**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

Autores: Quiñonez Alex  
Taípe Cristhian

Tutor: Prof. Paul Ayala

Febrero 2017



# Agenda

Estado del Arte

Diseño Mecánico

- Estado Inicial

- Adecuación

- Diseño y construcción de la camisa térmica

Diseño Eléctrico/Electrónico

- Sensores y actuadores

- Modelo del sistema

- Sistema de control

Conclusiones y Recomendaciones



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

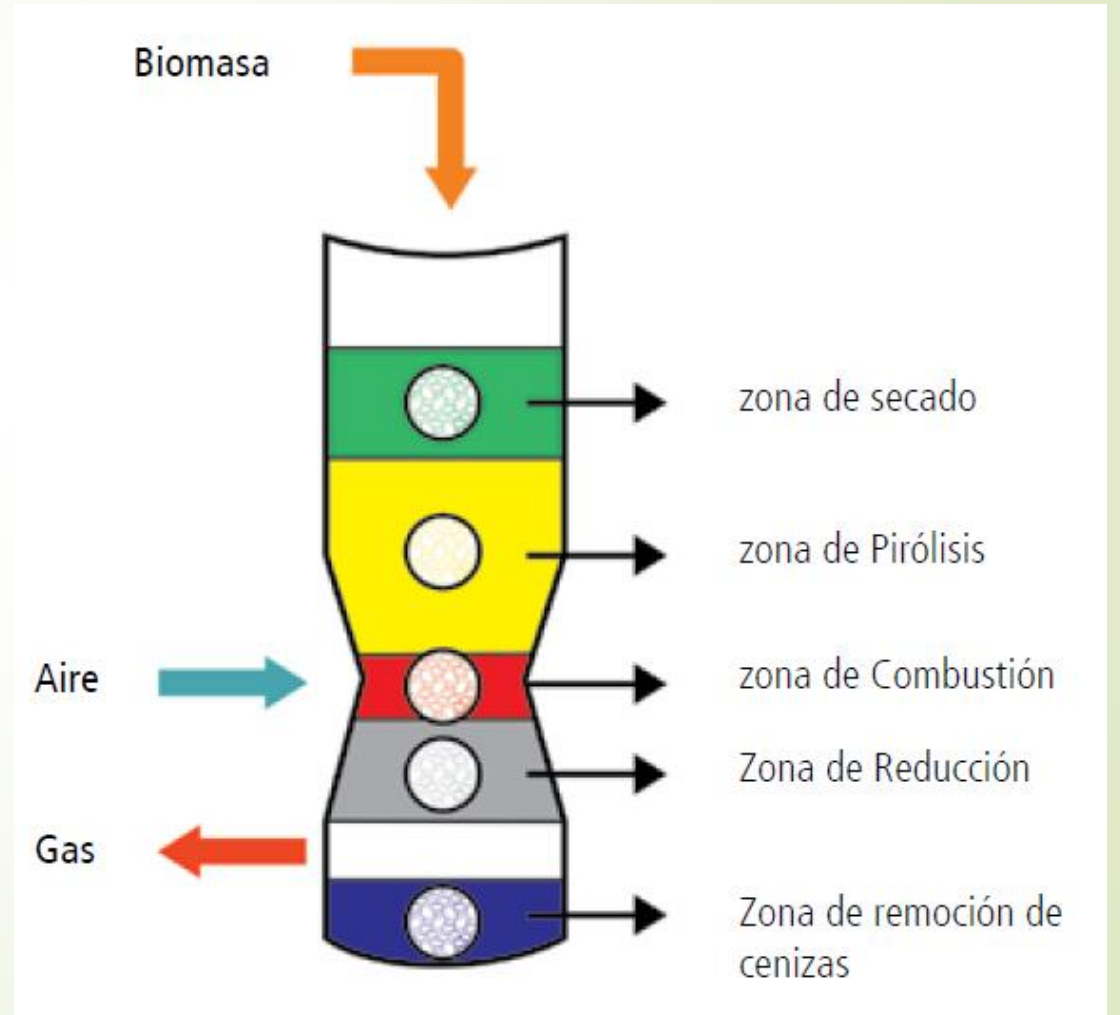
## Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico, que sirve para producir “Sinter gas” o “gas pobre”, mediante la combustión de residuos sólidos también llamados biomasa, tales como: madera, residuos agrícolas, y todo tipo de materia orgánica seca (Estrada, 2004 ).

## Proceso de Gasificación

### Secado

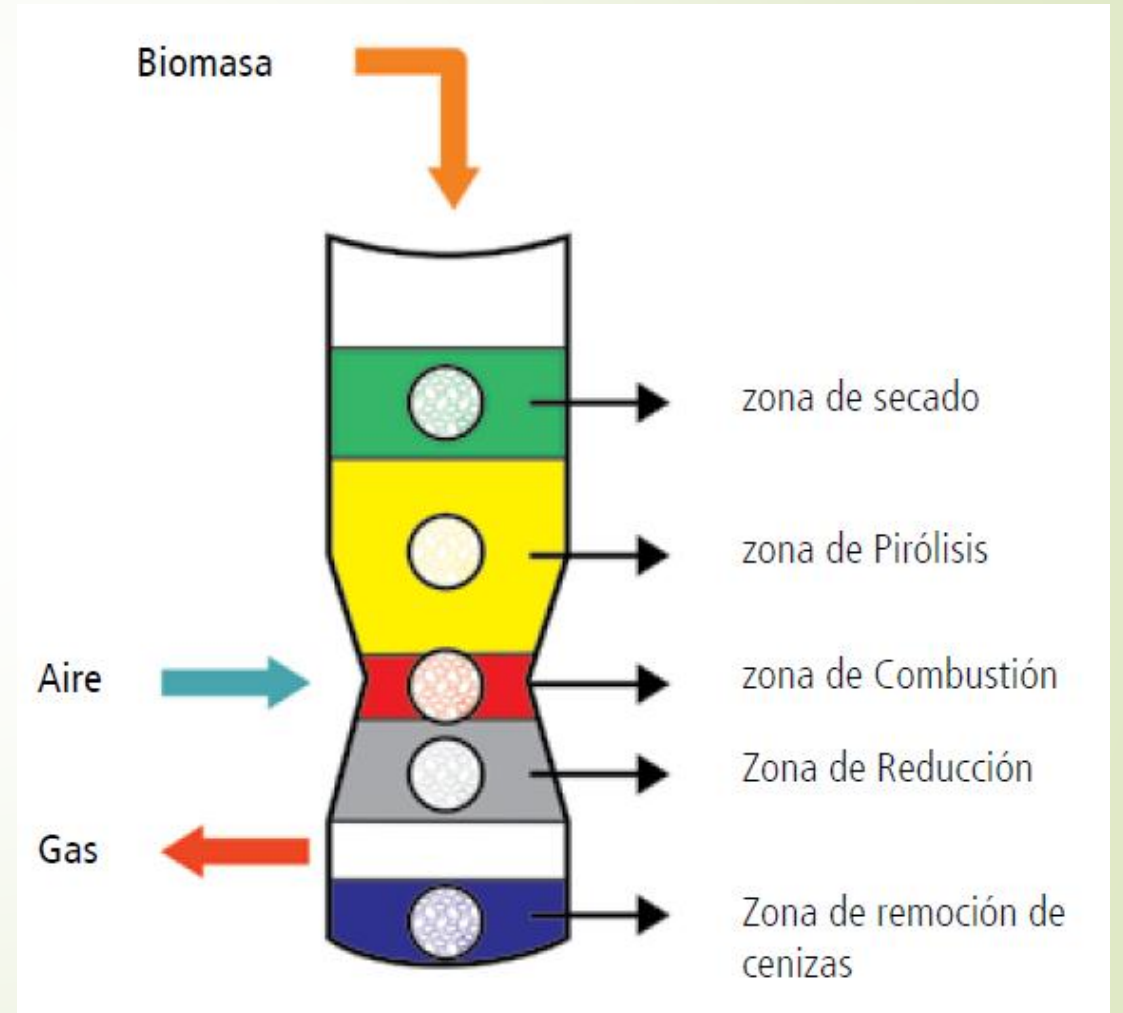
La biomasa se calienta y se seca, para evaporar parte de la humedad que contiene ésta, generalmente se usa biomasa seca con un porcentaje de humedad entre el 7 y 20% (Estrada, 2004 ).



# Proceso de Gasificación

## Pirólisis

La segunda etapa comprende un proceso de descomposición térmico de la biomasa, que se da en un rango de 300°C a 500°C (Estrada, 2004 ).

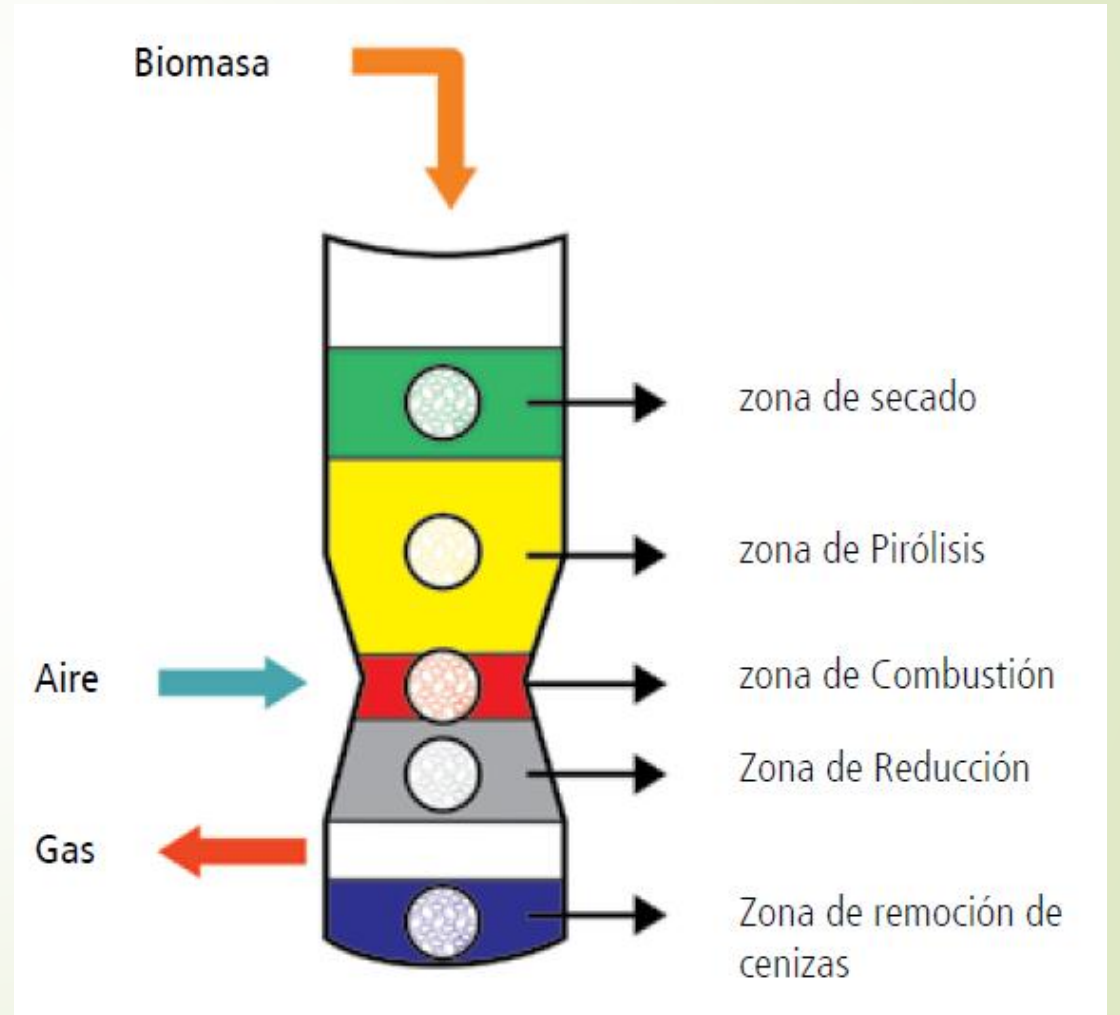




# Proceso de Gasificación

## Combustión u oxidación

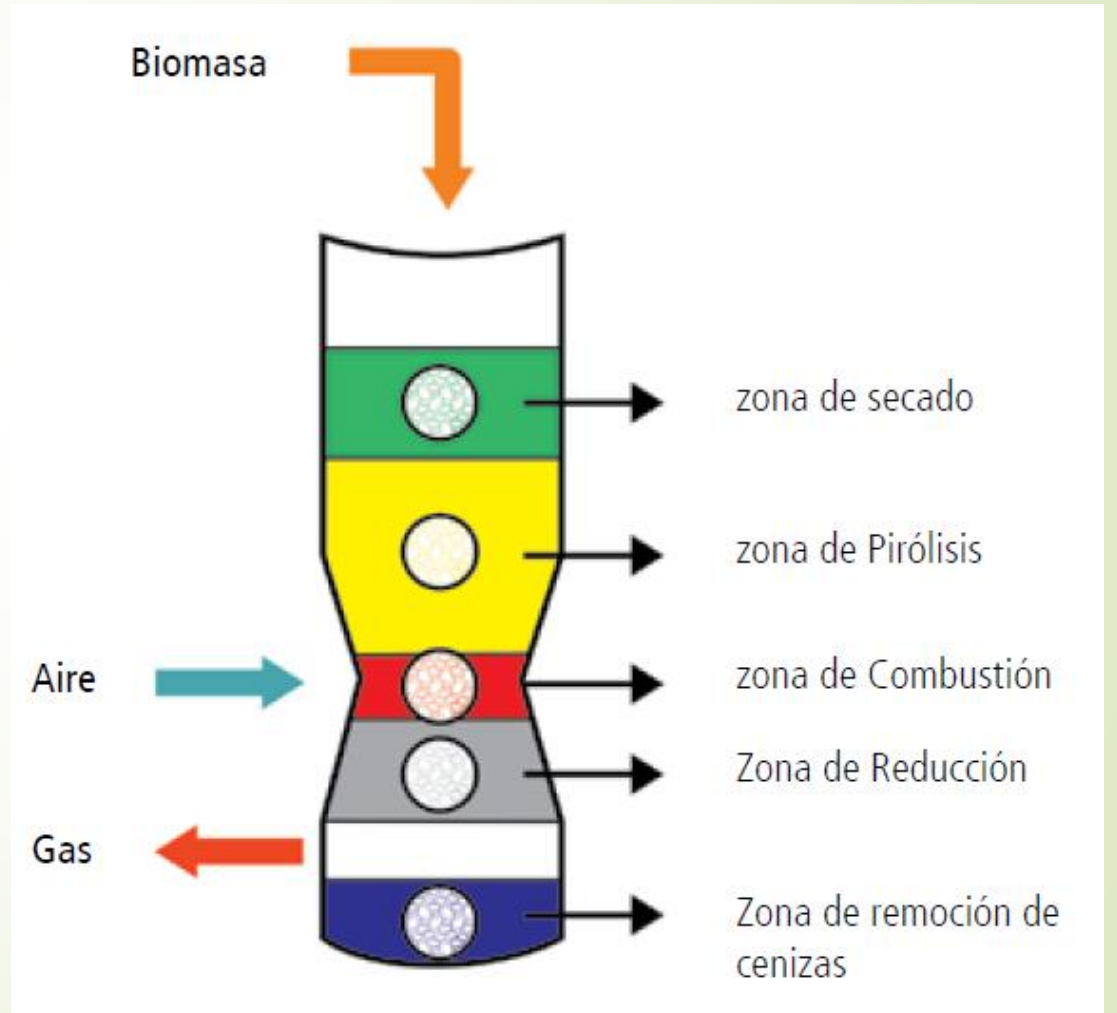
En este proceso se incorpora aire como agente oxidante, necesario para generar energía para las etapas de pirólisis y de reducción, se mantienen temperaturas de 600°C a 1400°C (Estrada, 2004).



# Proceso de Gasificación

## Reducción o gasificación

Esta etapa se convierte la biomasa en gas de síntesis con poder calorífico medio. (Estrada, 2004 ).





# Temperaturas medidas en las zonas del reactor de gasificación

En las zonas de combustión y reducción se da la mayor temperatura

Proceso de gasificación	Temperatura medida [°C]
Secado	80
Pirólisis	200
Combustión	600
Reducción	500



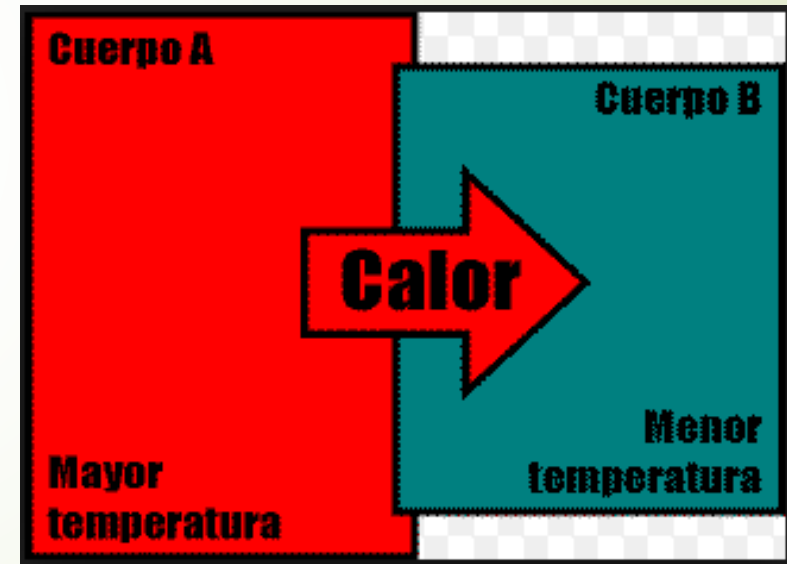


# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Transferencia de calor

La **transferencia de calor** es un proceso que se produce cuando dos cuerpos con diferentes temperaturas se ponen en contacto (Mills, 2004).



## Modos de Transferencia de Calor

### Conducción

El calor se transmite a través de un material fijo, por ejemplo, la transferencia de calor a través de la pared del mango de la olla (Mills, 2004).



# Modos de Transferencia de Calor

## Radiación

La radiación se efectúa por medio de fotones que viajan casi sin encontrar obstáculos a través del aire, de una superficie a otra (Mills, 2004).







# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Modos de Transferencia de Calor

### Convección

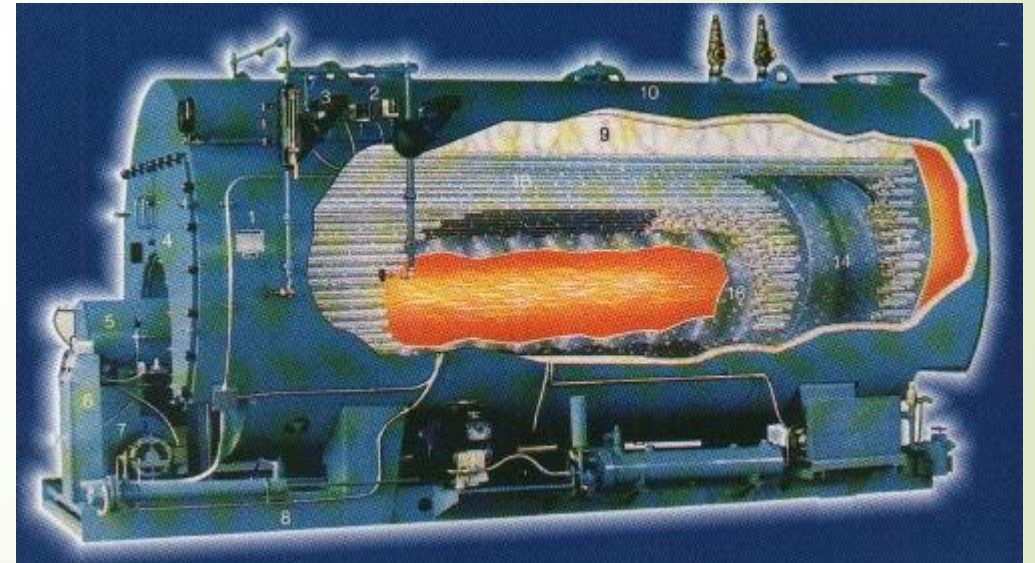
La transferencia de calor ocurre desde una superficie a un fluido en movimiento (Mills, 2004).





# Generación de Vapor

Son dispositivos usados para producir vapor de agua. Como fuente de calor se utiliza el calor en exceso que no se requiere para el proceso (González, 2015).

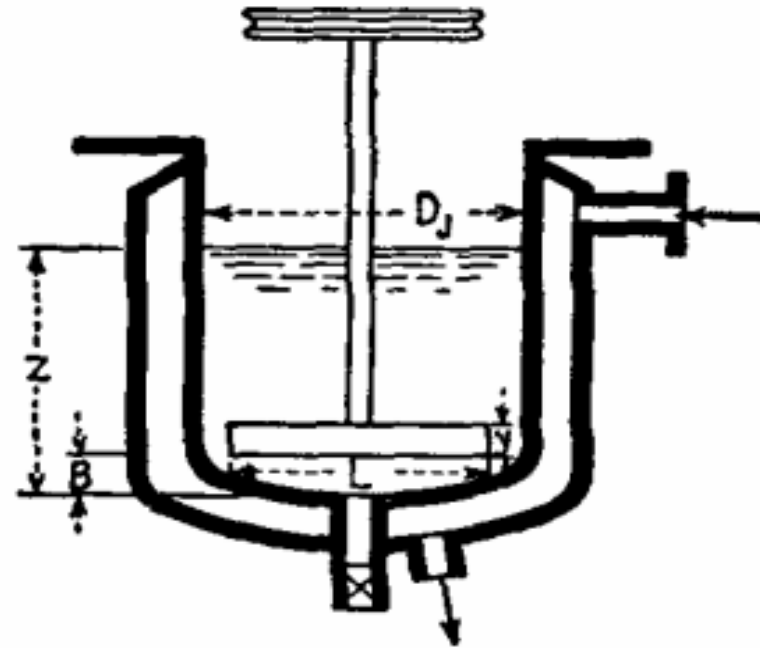






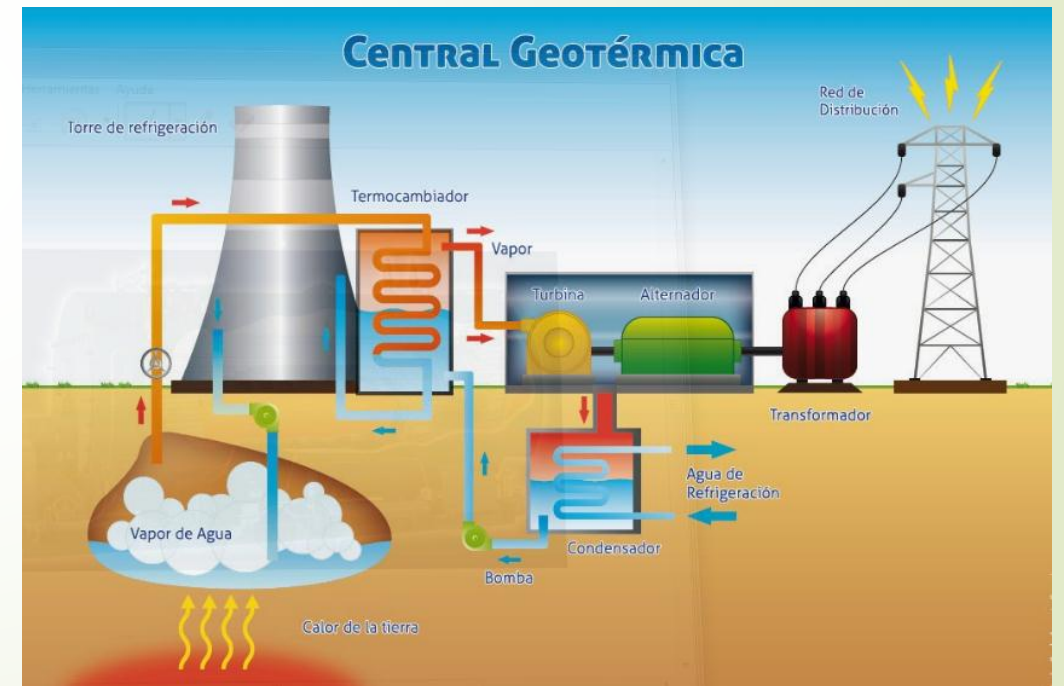
# Recipientes encamisados

El encamisado realiza el recubrimiento de la superficie donde se transfiere el calor (Procesos, 2010)



# Generación eléctrica por vapor

Las Centrales Termoeléctricas trabajan con la combustión de gas, el combustible se quema, lo que calienta una caldera, y con el vapor se mueve una turbina que genera la electricidad (Procesos, 2010)





## Estado Inicial del equipo

El proyecto inicial del gasificador tipo downdraft del DECEM, funcionaba al transformar biomasa en gas combustible; y usar el gas combustible como alternativa a la gasolina en un Jeep Willys







# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Adecuaciones

El equipo fue modificado en referencia al original, adecuándolo con un sistema de filtrado, transmisión de gas y un recipiente de dónde sale agua a presión, como si indica en la figura





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Adecuaciones

La zona exterior al cilindro del reactor, es donde se construyó el recipiente enchaquetado, con el fin de aprovechar la energía térmica que se produce en el reactor.







## Filtro de gas

Para la nueva aplicación se instaló esta etapa de filtrado, lo que permite eliminar la conexión al Jeep Willys 1974.





# Sistema de transmisión de gas

El sistema de eyector Venturi se implementó con la finalidad de extraer el gas pobre y de permitir el ingreso de aire a presión, para que actúe como agente oxidante y aumentar la energía en las etapas del reactor.





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Quemador

Sirve para observar la llama al obtener y encender el gas que salga por el tubo del quemador







# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Potencia de la fuente de calor

Para encontrar el valor de la potencia de la fuente de calor generada en el interior del gasificador, se parte de la siguiente ecuación de conducción de calor.

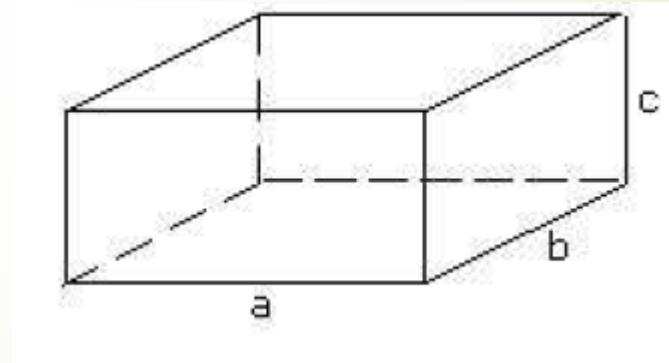
$$\frac{Q}{t} = kA \frac{T_c - T_f}{\varepsilon}$$

$$\frac{Q}{t} = 39780 [W]$$



# Volumen de agua en el encamisado

Para determinar el volumen de agua en el encamisado, utilizamos la fórmula para el volumen de un cubo.



$$V = 1,04 \times 10^4 [m^3]$$





# Cantidad de masa de agua en el encamisado

Para obtener la masa de agua que entra en el encamisado, partimos de la ecuación de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m_{AGUA} = 104[g]$$



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Potencia para generar vapor

Se utiliza la ecuación de calor mostrada, para determinar la potencia a la salida del encamisado térmico y garantizar la generación de vapor.

$$\frac{Q}{t} = m \times c_e \times \Delta T$$

$$\frac{Q}{t} = 32650 [W]$$



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Eficiencia térmica

La cantidad de energía para producir vapor es 39780 W y la cantidad de energía necesaria para generar vapor es 32650 W

$$e_f = 82 \%$$



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Diseño Eléctrico

### Sensor de temperatura

Es un dispositivo que transforma las variaciones de temperatura en cambios de señales eléctricas que son procesadas por un equipo eléctrico. [Sotillo, 2013].

### Sensor de Caudal

Es un dispositivo para medir el volumen de un fluido en un determinado tiempo.



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Termopares

Se mide la tensión que es proporcional a la variación de temperatura. Este tipo de sensor también requiere un acondicionamiento de la señal. Soportan altas temperaturas, óptimos para calderas y además son bastante lineales [Bordóns, 2016]

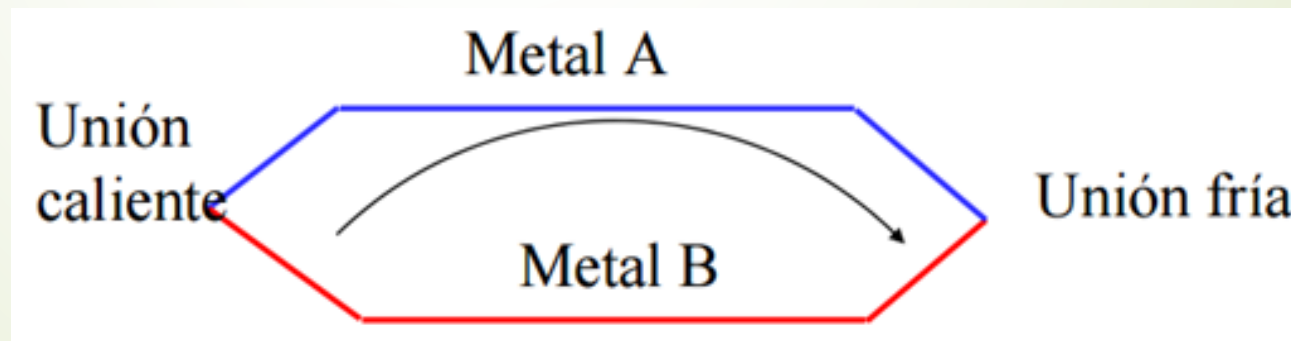






Tabla 1.1: Tipos de termocuplas

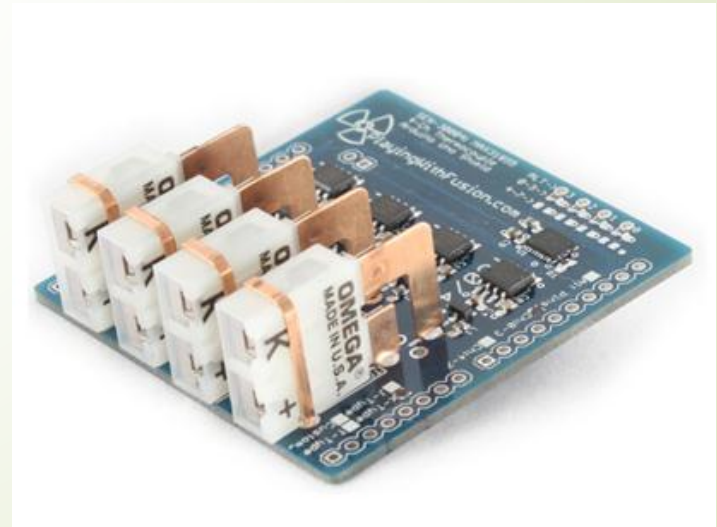
Tipo	Características
Termopar J: Hierro y Constatan (Cu-Ni)	Afectado por corrosión Rango: 0°C a 750°C Precisión: 0.5 %
Termopar K: Cromo y Alumel (Al-Ni)	Buena resistencia a la oxidación Rango: 0°C a 1300°C y 600°C a 1000°C en atm.oxidantes Precisión: 1 %
Termopar R: Platino y Platino-13 % Rodio Termopar S: Platino y Platino-10 % Rodio	Rango de medida más amplio (0°C a 1600°C) más costosos Precisión: 0.5 %
Termopar W: Wolframio-5 % Renio Wolframio-26 % Renio	Rango: 0°C a 2800°C en atm. Inertes o vacío Precisión: 1 %

Fuente: [Bordóns, 2016]



# Acondicionamiento de la termocupla tipo K

- Amplificación de Tensión
- Eliminan los ruidos de las señales
- Conexión con tarjetas electrónicas
- Módulo SEN-30004: MAX31855





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Sensor de Flujo YF-S201

Este sensor se acopla a cualquier tubería, tiene un sensor de molino para medir el volumen de líquido por unidad de tiempo, posee un sensor magnético de tipo Hall que manda un impulso eléctrico con cada revolución. [Chips, 2016].





# Actuador

Para el proceso de generación de vapor, el actuador que se requiere en el sistema es uno de tipo eléctrico. Este actuador controla el caudal que ingresa a la camisa térmica, en función de una tensión, por lo tanto, una electroválvula cumple estas condiciones.





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Selección del microcontrolador

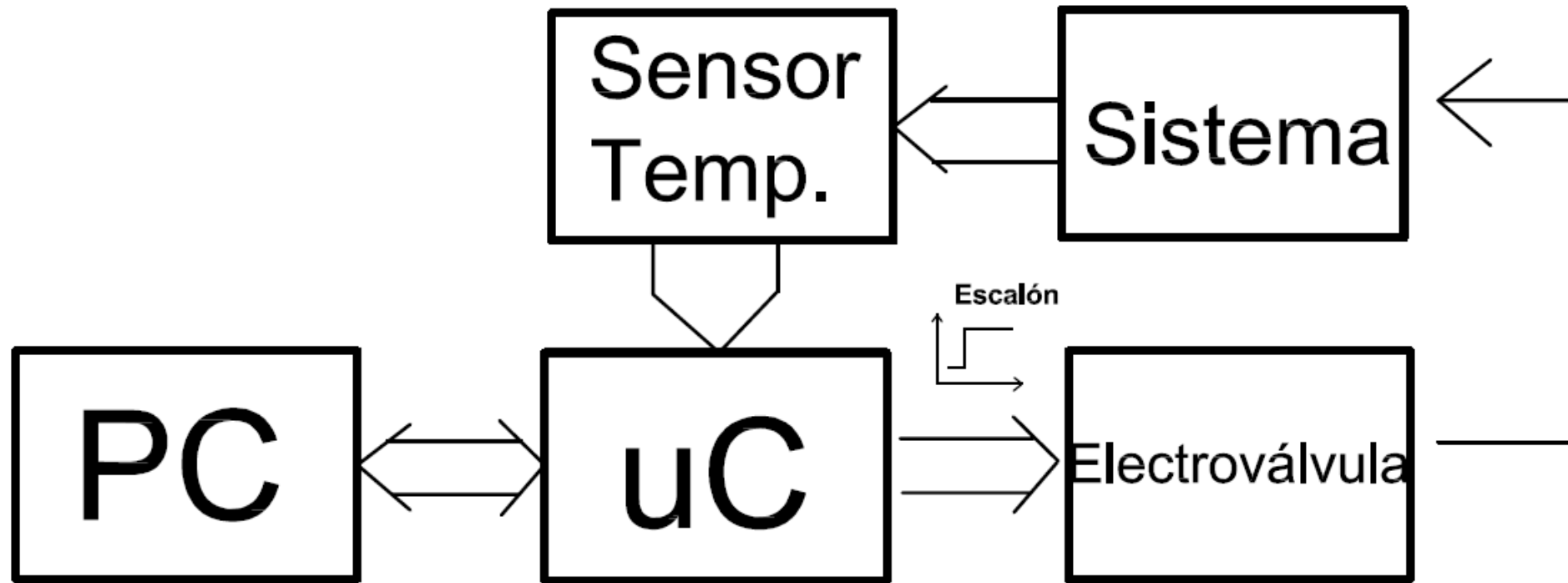
- Lectura de datos de los sensores.
- Tiempo de adquisición de datos tiempo muestreo 500 ms.
- Bajo de costo y la arquitectura es abierta.
- Arduino UNO







# Adquisición de datos

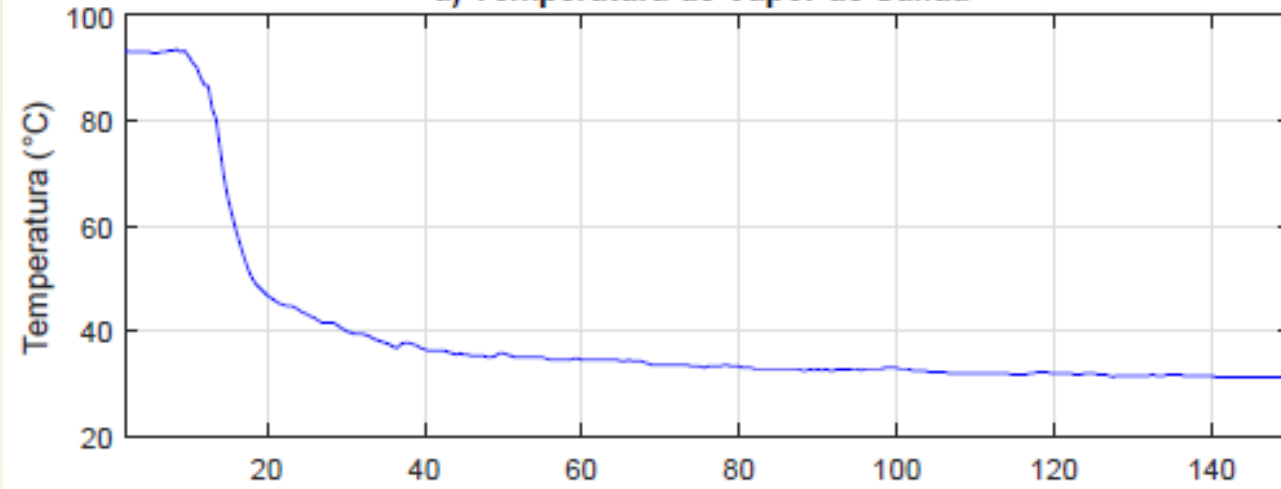




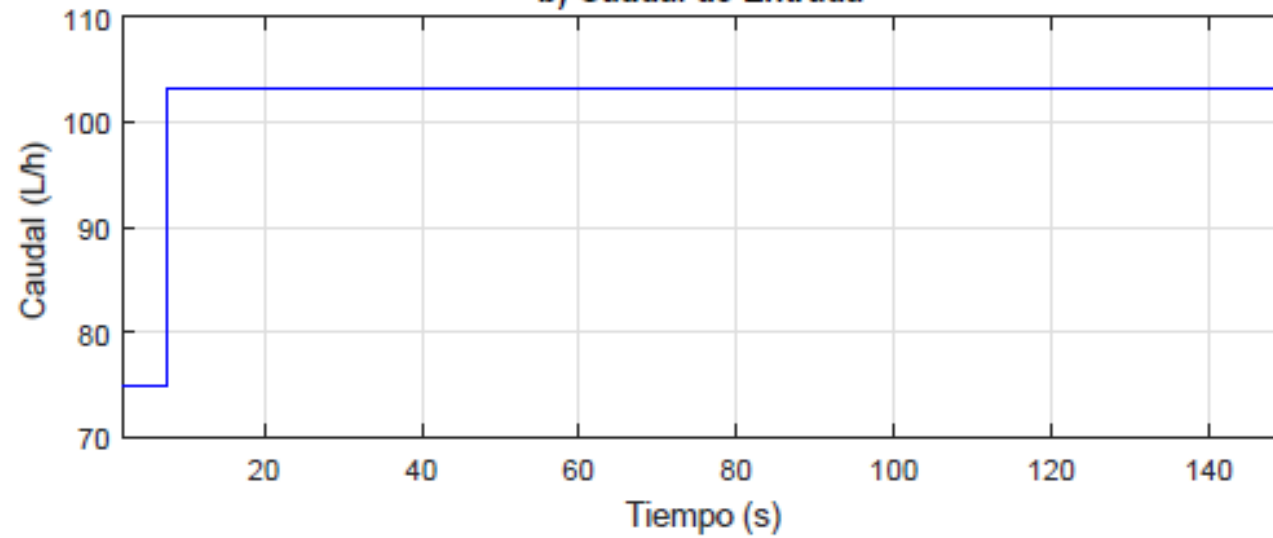
# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

a) Temperatura de Vapor de Salida



b) Caudal de Entrada





# Función de Transferencia

$$\frac{T(S)}{Q(s)} = G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp1 \times s)(1 + Tp2 \times s)}$$

donde:

$$Kp = -4,08$$

$$Tp1 = 4,04$$

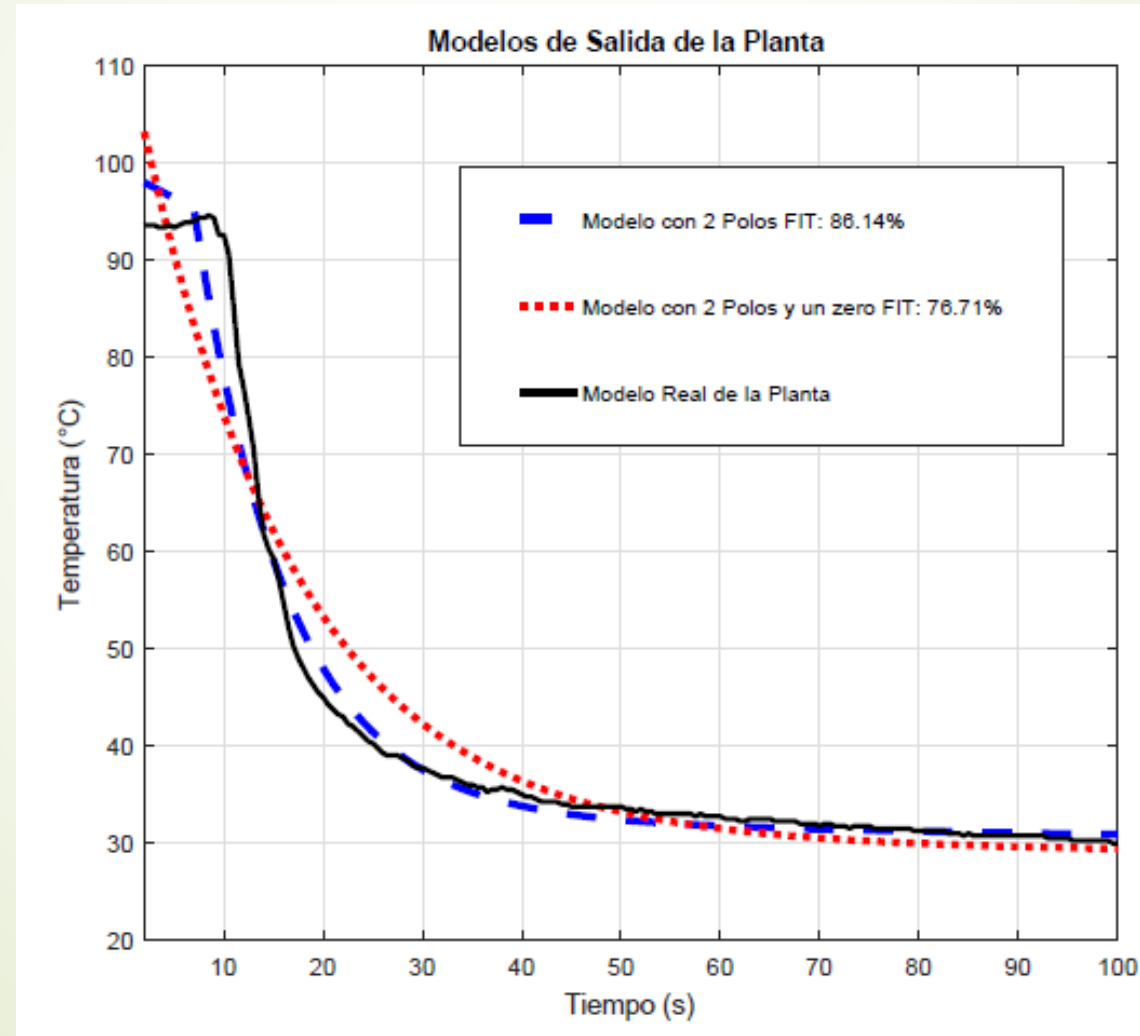
$$Tp2 = 4,07$$

$$G(s) = \frac{-4,08}{(1 + 4,04s) + (1 + 4,07s)}$$

$$G(s) = \frac{-4,08}{16,44s^2 + 8,11s + 1}$$



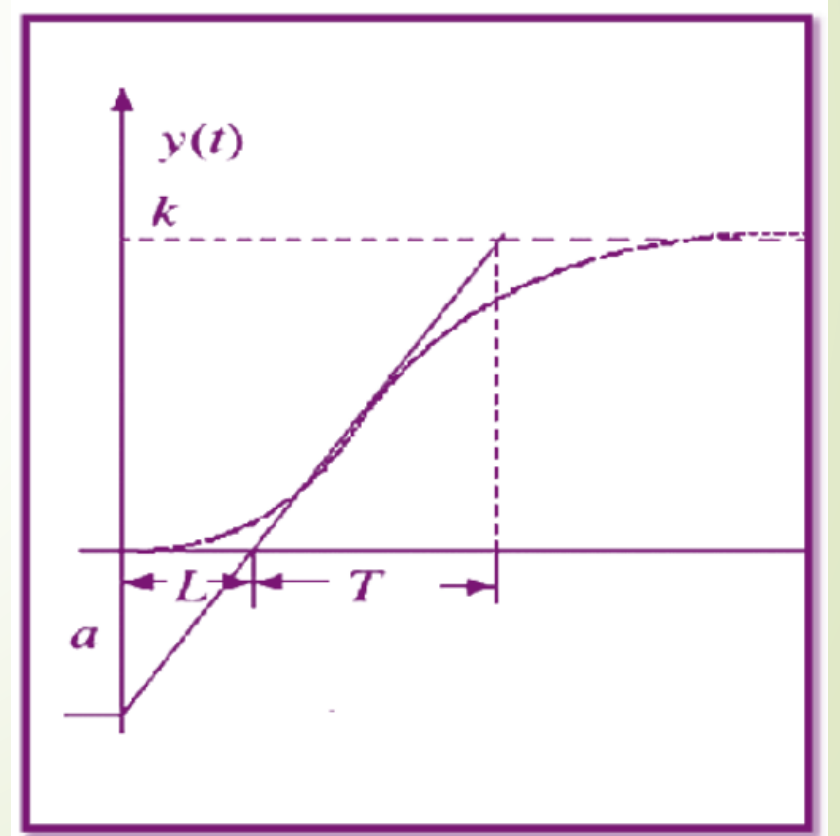
# Modelos Matemáticos de la Planta



# Diseño del Controlador mediante la sintonización de controladores de Ziegler-Nichols

Tipo de Controlador	$K_P$	$T_I$	$T_D$
P	$1/a$	$\infty$	0
PI	$0,9/a$	$3L$	0
PID	$1,2/a$	$2L$	$L/2$

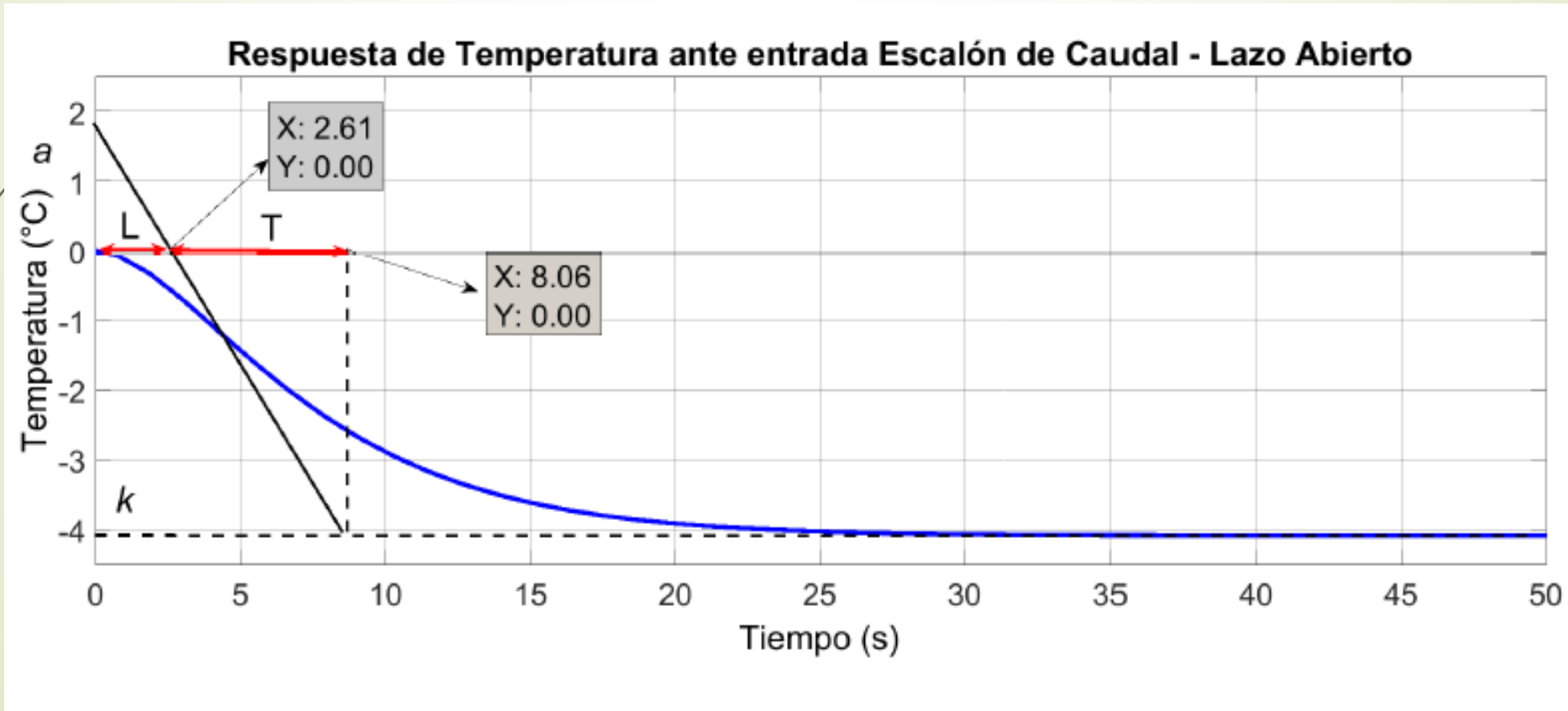
Fórmulas de sintonización de Ziegler-Nichols







# Obtención de los valores $a$ , $k$ , $L$ y $T$ , del modelo de la planta ante una entrada escalón en lazo abierto



## Controlador PI

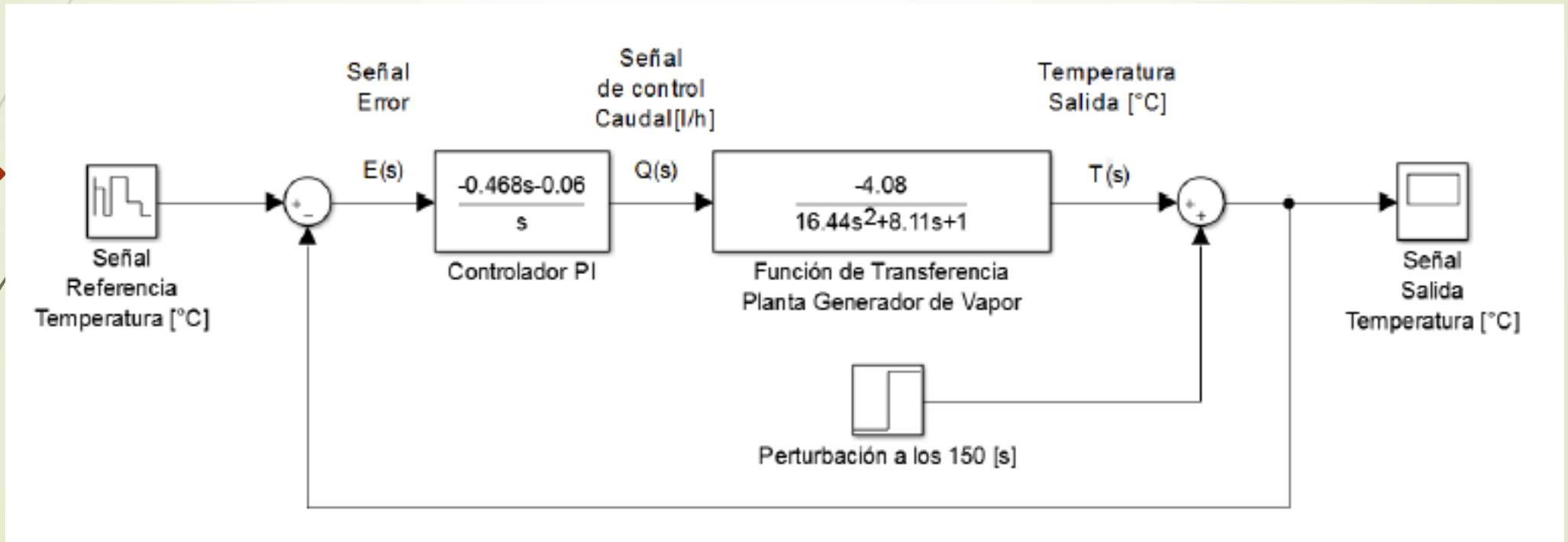
- No genera sobrepicos, que pueda afectar al actuador y al proceso.
- Mejor tiempo de estabilización.

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

$$G_c(s) = -0,468 - \frac{0,06}{s}$$



# Diagrama de bloques del Sistema Controlado

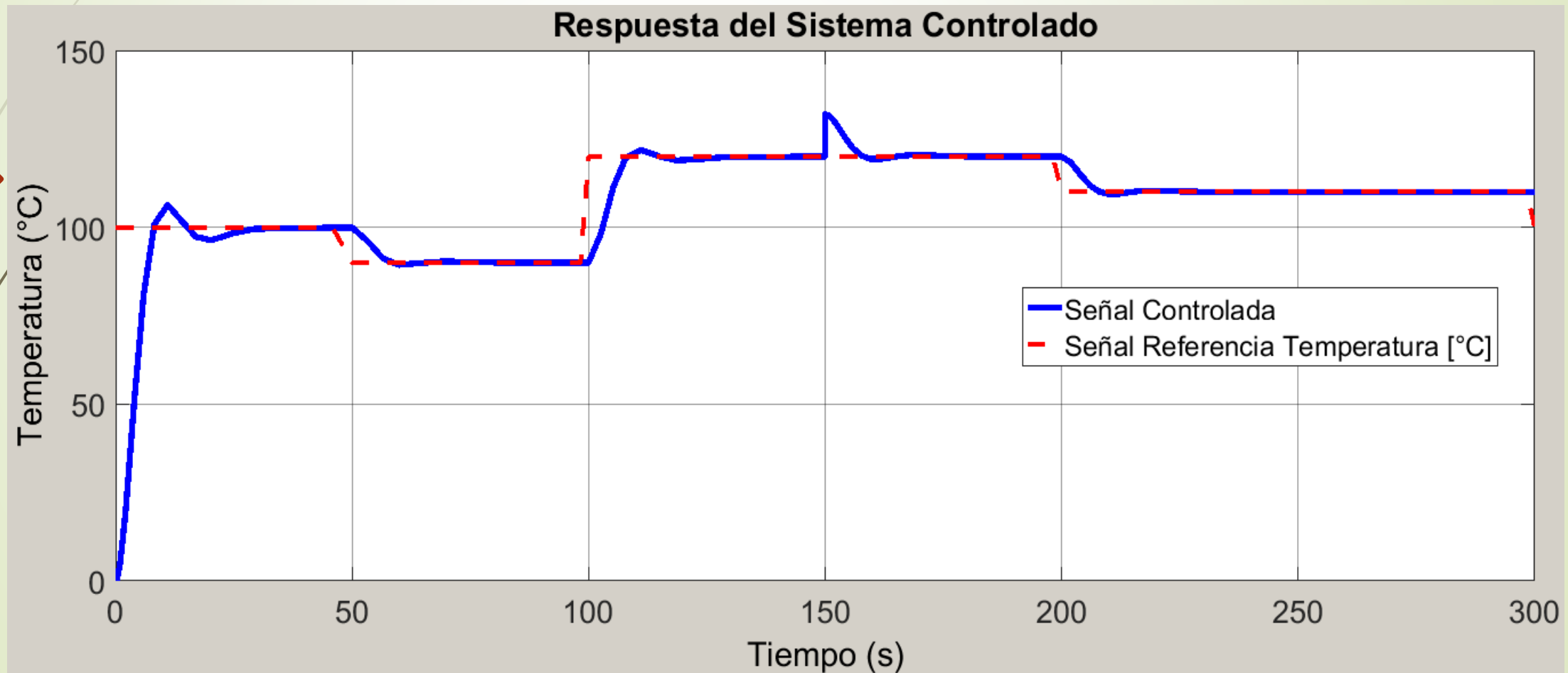




# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Respuesta del Sistema Controlado en función del tiempo









# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Conclusiones

- Se determinó que es factible implementar un sistema de generación de vapor para optimizar la temperatura en un gasificador tipo downdraft.
- Una de las ventajas de diseñar un controlador PI, es que reduce el error en estado estacionario, y los sobrepicos se reducen. En el proceso de generación de vapor se desea tener una temperatura estable ya que el vapor es para una aplicación térmica y la temperatura no debe oscilar.



## Recomendaciones

- La mejor manera de optimizar la temperatura del gasificador, es construir un encamisado térmico en la zona del reactor desde su concepción.
- En la parte del tanque que provee el agua hacia el encamisado, se puede añadir un indicador de presión para saber la presión de salida de agua.
- Al implementar el control, se recomienda cambiar la electroválvula on/off, por una electroválvula proporcional. Las ecuaciones se mantienen, porque la planta no varía.



**GRACIAS**