

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**

**CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA**

**PERÍODO ACADÉMICO: 202251 MAY23 – SEP23**

**AUTOR: Jarrín Diego**

**Trabajo de titulación, previo a la obtención del  
título de Ingeniero Mecánico**

**TEMA:** Estudio computacional del comportamiento termo -  
fluido dinámico de un tanque de cuarenta y  
cinco mil barriles de crudo para el bloque 43 del ITT Tiputini

**Fecha:** 31/08/2023



**OBJETIVOS**

**General**

Estudiar computacionalmente el comportamiento termo - fluido dinámico de un tanque de cuarenta y cinco mil barriles de crudo para el bloque 43 del ITT Tiputini

**Específicos**

Estudiar computacionalmente el enfriamiento de crudo en un tanque de almacenamiento de cuarenta y cinco mil barriles de crudo.

Estudiar computacionalmente el comportamiento termo - fluido dinámico de un tanque de cuarenta y cinco mil barriles de crudo.

Que cuenta con

Un solo ingreso de crudo caliente

Dos ingresos para el crudo caliente

Un difusor radial para el ingreso de crudo caliente

**JUSTIFICACIÓN**

Se tiene un crudo pesado con grado API 13.9

El crudo alcanza una altura de 9.75 [m] y ocupa un volumen máximo de 5761.64 [m<sup>3</sup>].

Representa un ahorro energético y económico.

### Enfriamiento

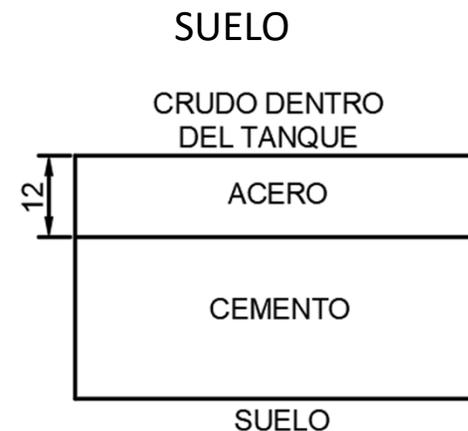
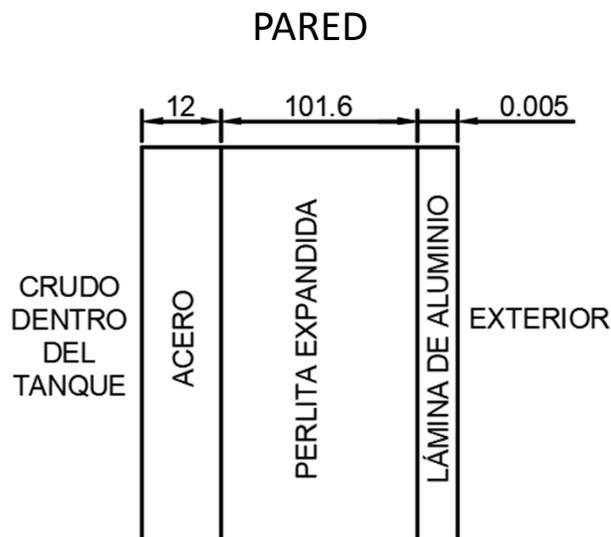
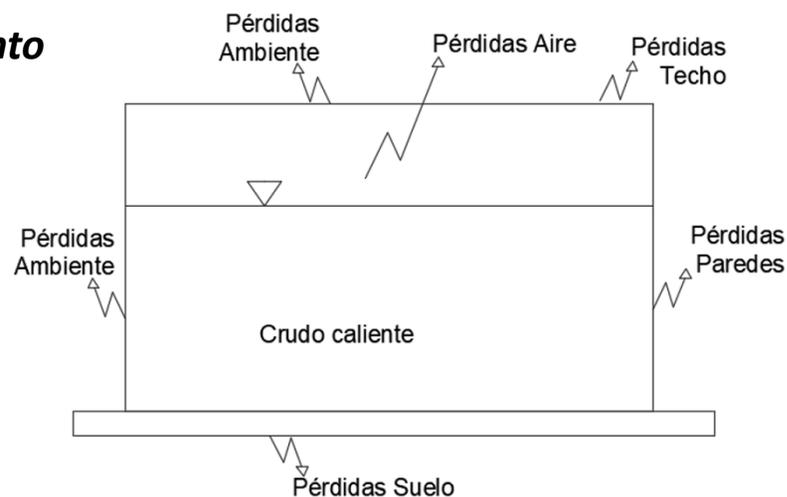
$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p V \nabla T - k \nabla^2 T - \mu \Phi_v - \dot{G} = 0$$

$$\frac{dQ}{dt} = k * A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta X}$$

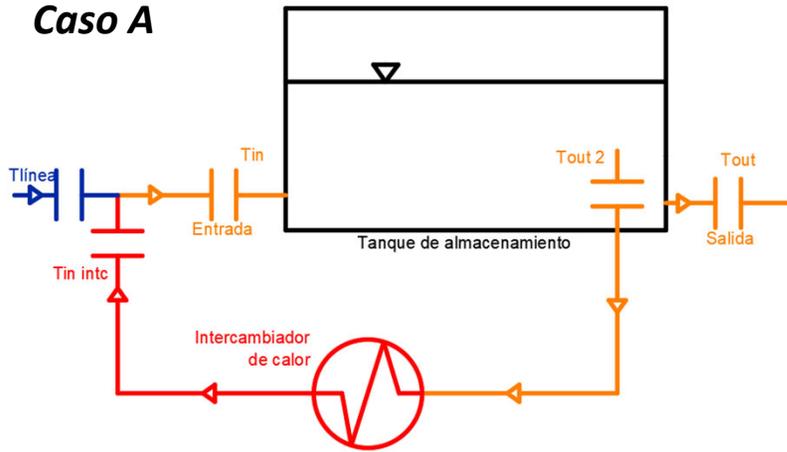
$$q = h_{ext} * (T_{ext} - T_w)$$

$$h_{suelo} = \frac{k_{suelo}}{\sqrt{\pi * \alpha_{suelo} * t}}$$

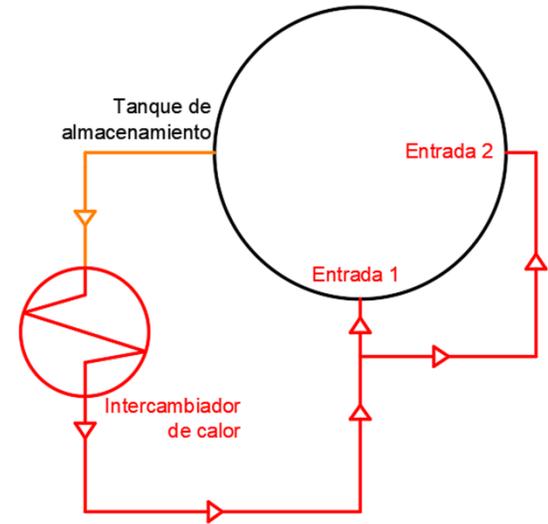


# Calentamiento

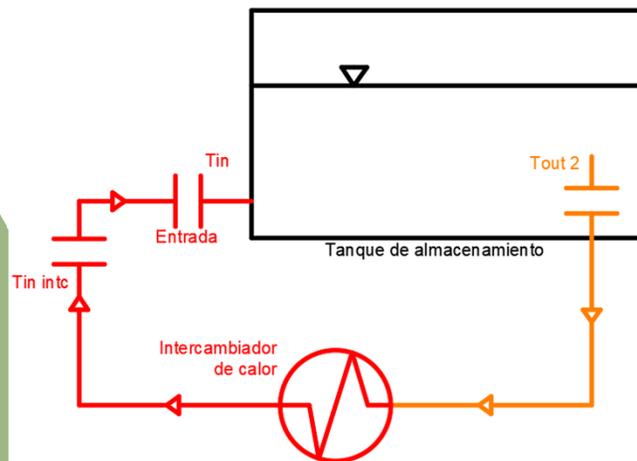
## Caso A



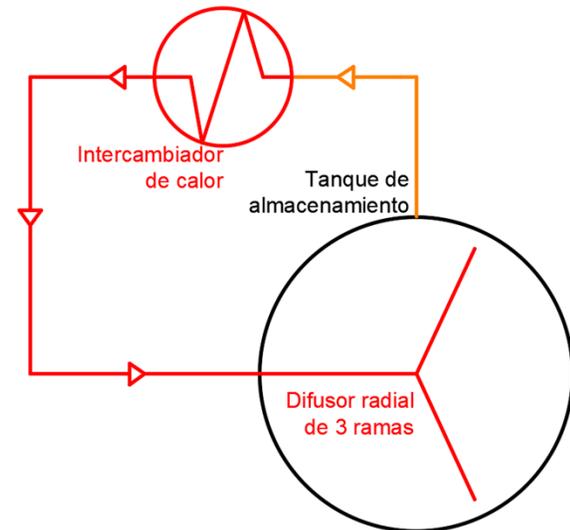
## Caso B2



## Caso B1



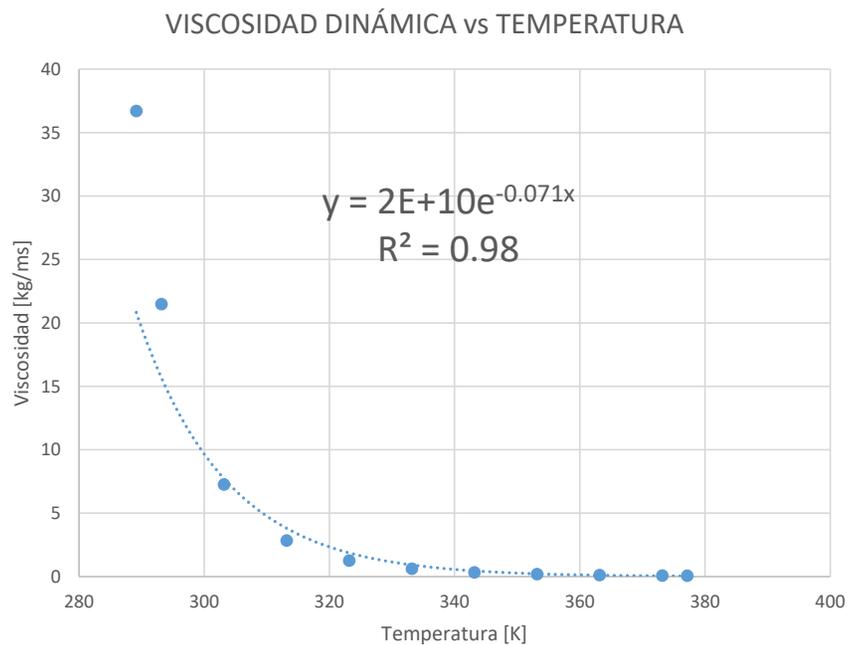
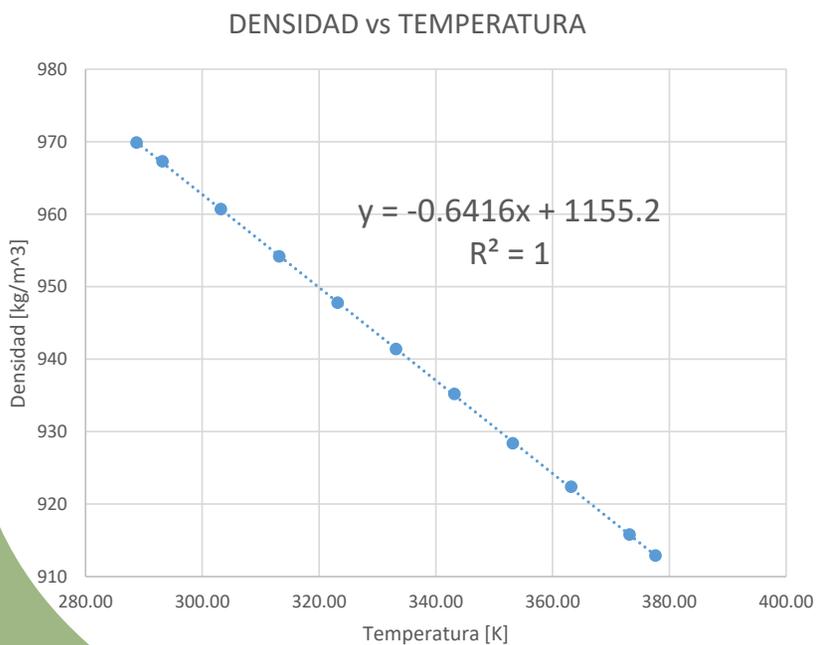
## Caso B3



## PROPIEDADES DEL CRUDO

$$C_p = 1970 \left[ \frac{J}{kg K} \right]$$

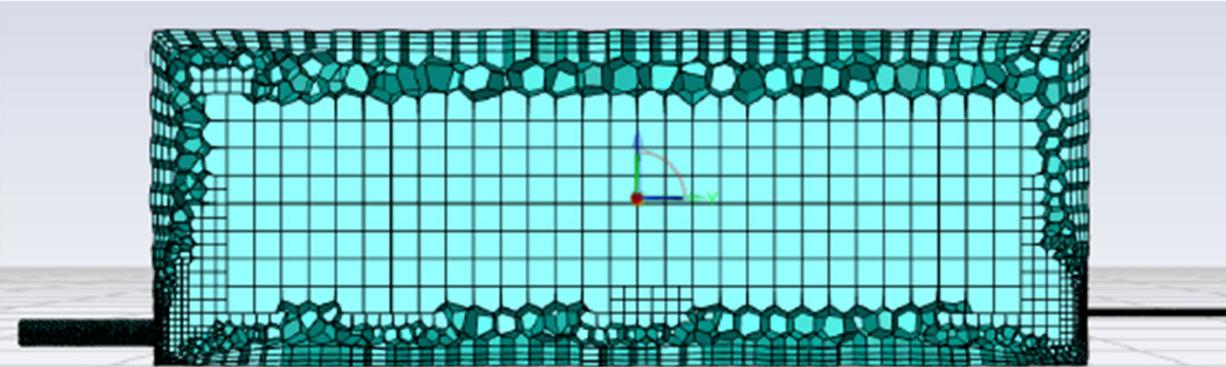
$$k = 1.2 \left[ \frac{W}{m K} \right]$$



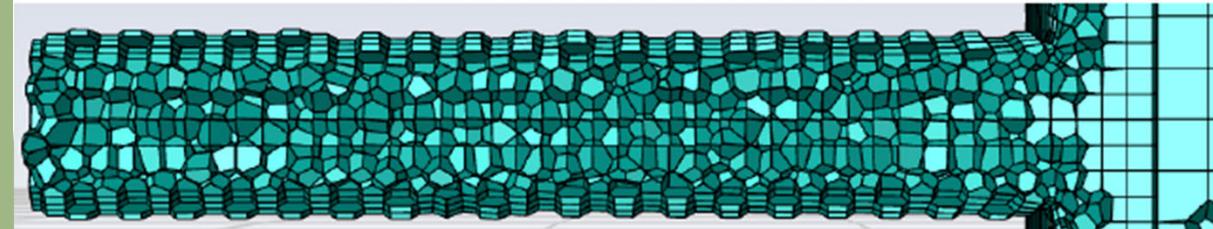


## MALLADO

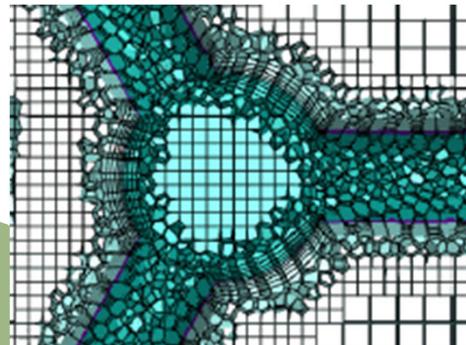
CORTE LATERAL TOTAL



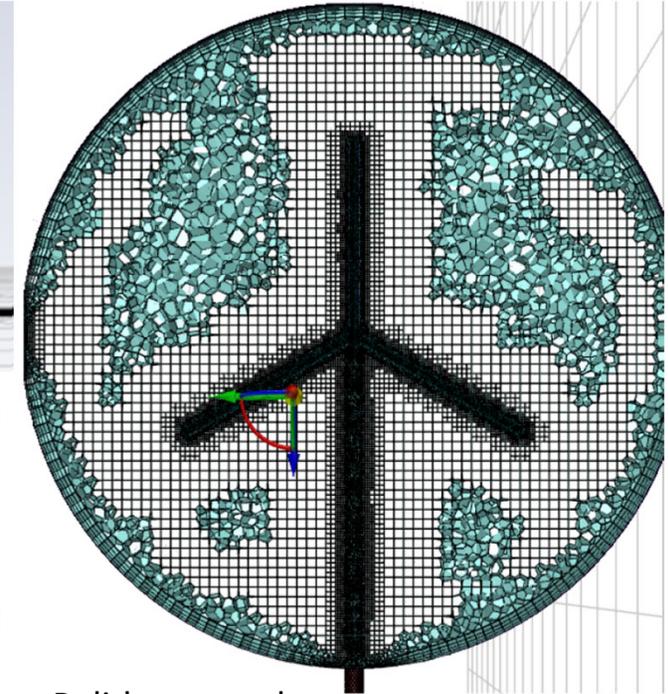
CORTE LATERAL DE LA TUBERÍA



MALLA EN LA TUBERÍA DEL DIFUSOR



CORTE SUPERIOR A 1.4 [m] DE LA MALLA CON DIFUSOR



Elementos utilizados: Poli-hexagonales

Número de elementos casos A, B1 y B2: 62851

Número de elementos caso B3: 249874

Tamaño mínimo: 1 cm

Tamaño máximo: 80 cm

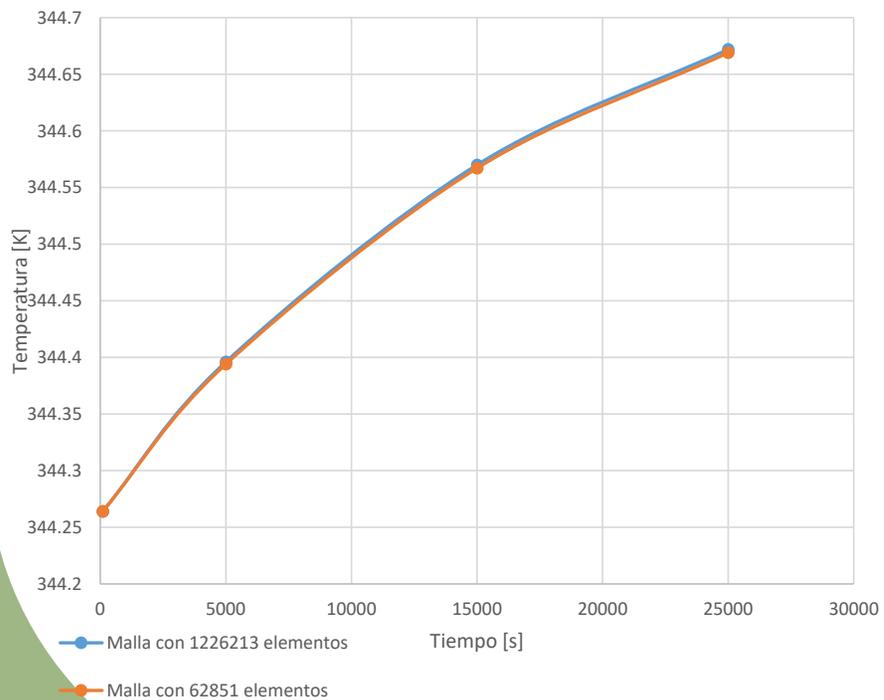
Oblicuidad: 0.85

Ortogonalidad: 0.22

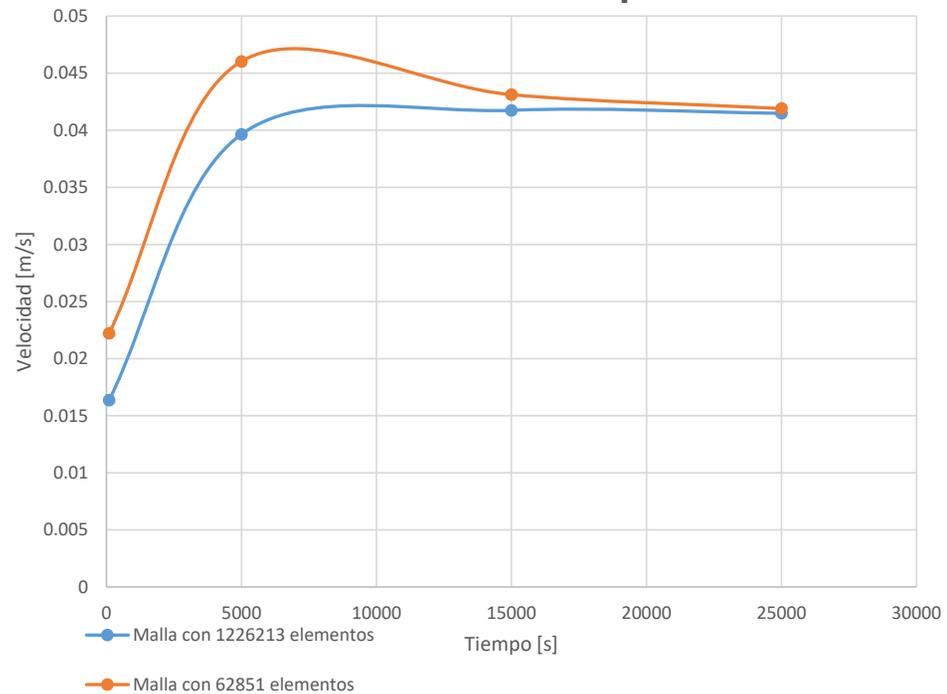


## CONVERGENCIA DE MALLA

### Temperatura vs Tiempo

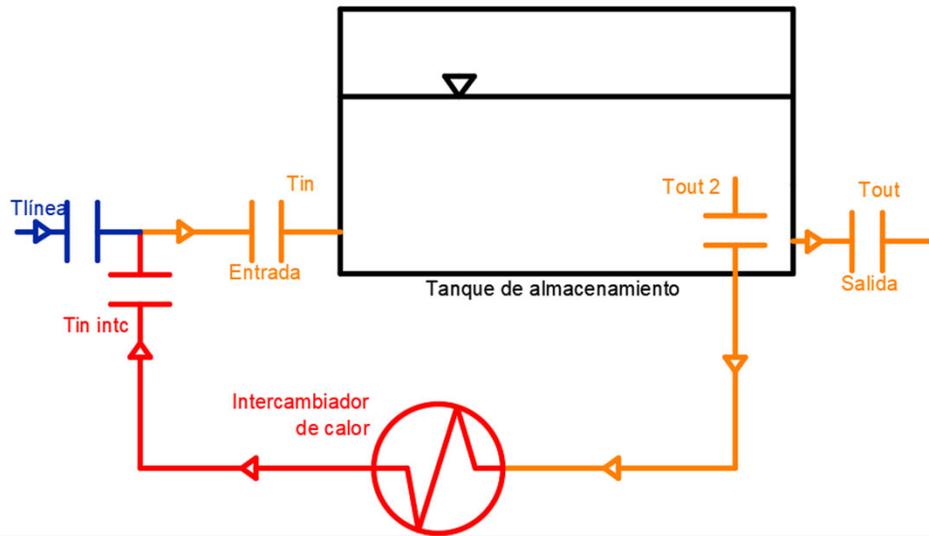


### Velocidad vs Tiempo





### CONDICIONES PARA SIMULACIÓN



- Modelo transitorio
- Modelo energético por defecto
- Modelo de turbulencia:  $k - \epsilon$
- En la parte superior se considera una superficie libre

$$\frac{\partial u, v, w}{\partial x} = \frac{\partial u, v, w}{\partial y} = \frac{\partial u, v, w}{\partial z} = 0$$

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{línea} + \dot{m}_{intc} \quad \dot{V}_{in} = \dot{V}_{línea} + \dot{V}_{intc}$$

$$\dot{V}_{in} = 0,3106 \left[ \frac{m^3}{s} \right] + 0,023 \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 0,3336 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$velocidad = \frac{\dot{V}_{in}}{Area} = \frac{0,336 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,456 \left[ m^2 \right]} = 0,74 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \Delta T_{ml} = \frac{(T_{vin} - T_{in}) - (T_{vout} - T_{out2})}{\ln\left(\frac{T_{vin} - T_{in}}{T_{vout} - T_{out2}}\right)}$$

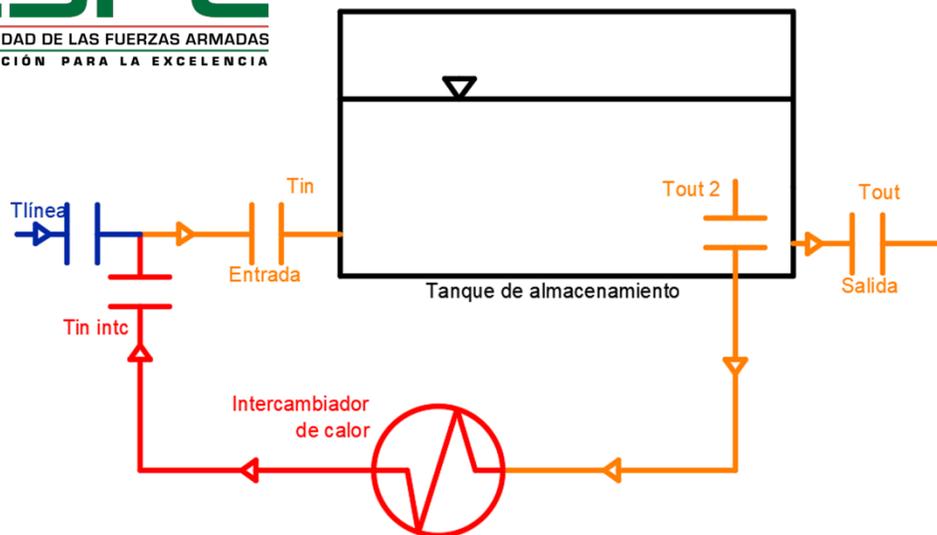
Temperatura de ingreso utilizada en los casos B1, B2 y B3

$$T_{intc} = T_{vin} - \Delta T_2 * e^{\frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta T_{ml}}}$$

Temperatura de ingreso utilizada en el caso A

$$\dot{m}_{in} C_p T_{in} = \dot{m}_{línea} C_p T_{línea} + \dot{m}_{intc} C_p T_{intc}$$

$$T_{entrada} = \frac{\dot{V}_{línea} T_{línea} + \dot{V}_{intc} T_{intc}}{\dot{V}_{in}}$$



*Condiciones de borde para el enfriamiento*

Superficie	Condición	Valor / Denominación
Entrada 1	Flujo másico	0 [kg/s]
Salida 1	Flujo másico	0 [kg/s]
Salida 2	Flujo másico	0 [kg/s]
Techo	Convección aire	$h_{velocidad}$ [W/m <sup>2</sup> K]
Techo, pared	Convección ambiente	116.8 [W/m <sup>2</sup> K]
Techo, pared	Conducción (acero, perlita, aluminio)	49, 0.04, 211 [W/mK]
Suelo	Conducción acero	49 [W/mK]
Suelo	Sólido semi-infinito	$h_{tiempo}$ [W/m <sup>2</sup> K]
Techo	Superficie libre	$\frac{\partial u,v,w}{\partial x} = \frac{\partial u,v,w}{\partial y} = \frac{\partial u,v,w}{\partial z} = 0$

*Condiciones de borde para el calentamiento, caso A*

Superficie	Condición	Valor / Denominación
Entrada 1	Velocidad de entrada	0.74 [m/s]
Entrada 1	Temperatura de entrada	$T_{entrada}$ [K]
Salida 1	Flujo de salida	1
Salida 2	Flujo de salida	1

*Condiciones de borde para el calentamiento, caso B opción 1*

Superficie	Condición	Valor / Denominación
Entrada 1	Velocidad de entrada	0.05 [m/s]
Entrada 1	Temperatura de entrada	$T_{entrada}$ [K]
Salida 1	Flujo de salida	0
Salida 2	Flujo de salida	1

*Condiciones de borde para el calentamiento, caso B opción 2*

Superficie	Condición	Valor / Denominación
Entrada 1,2	Velocidad de entrada	0.025 [m/s]

*Condiciones de borde para el calentamiento, caso B opción 3*

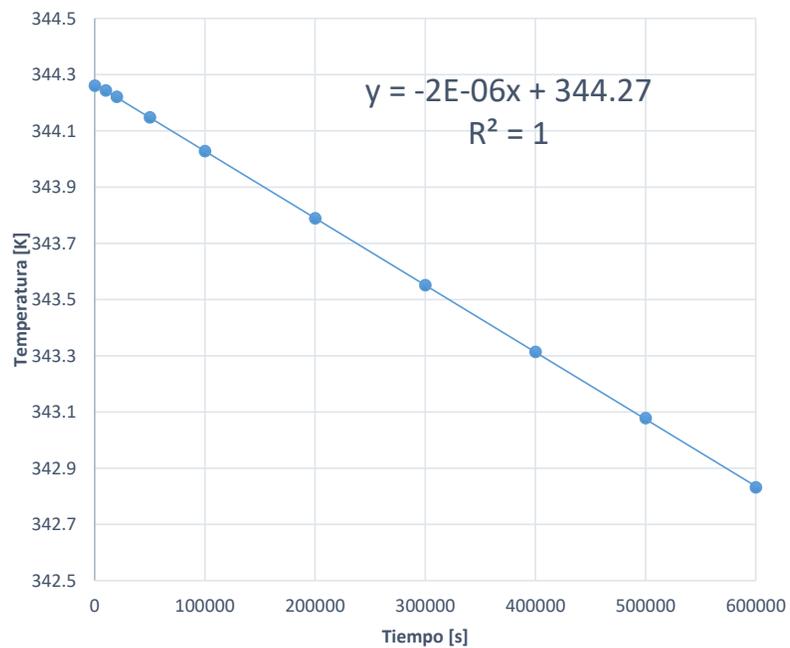
Superficie	Condición	Valor / Denominación
Entrada 1	Velocidad de entrada	0.05 [m/s]



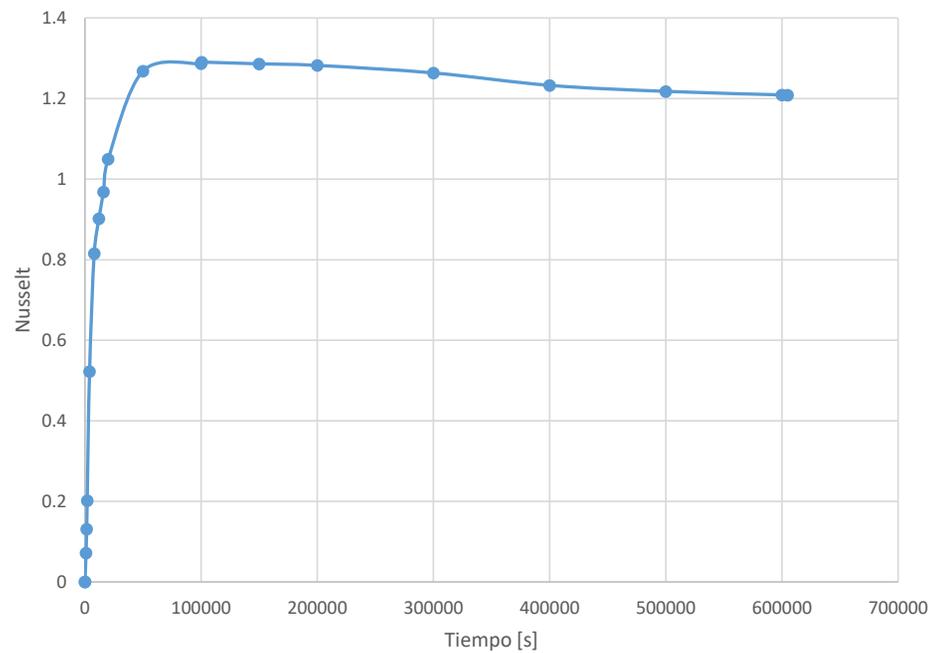
## RESULTADOS

### ENFRIAMIENTO

Temperatura promedio vs Tiempo



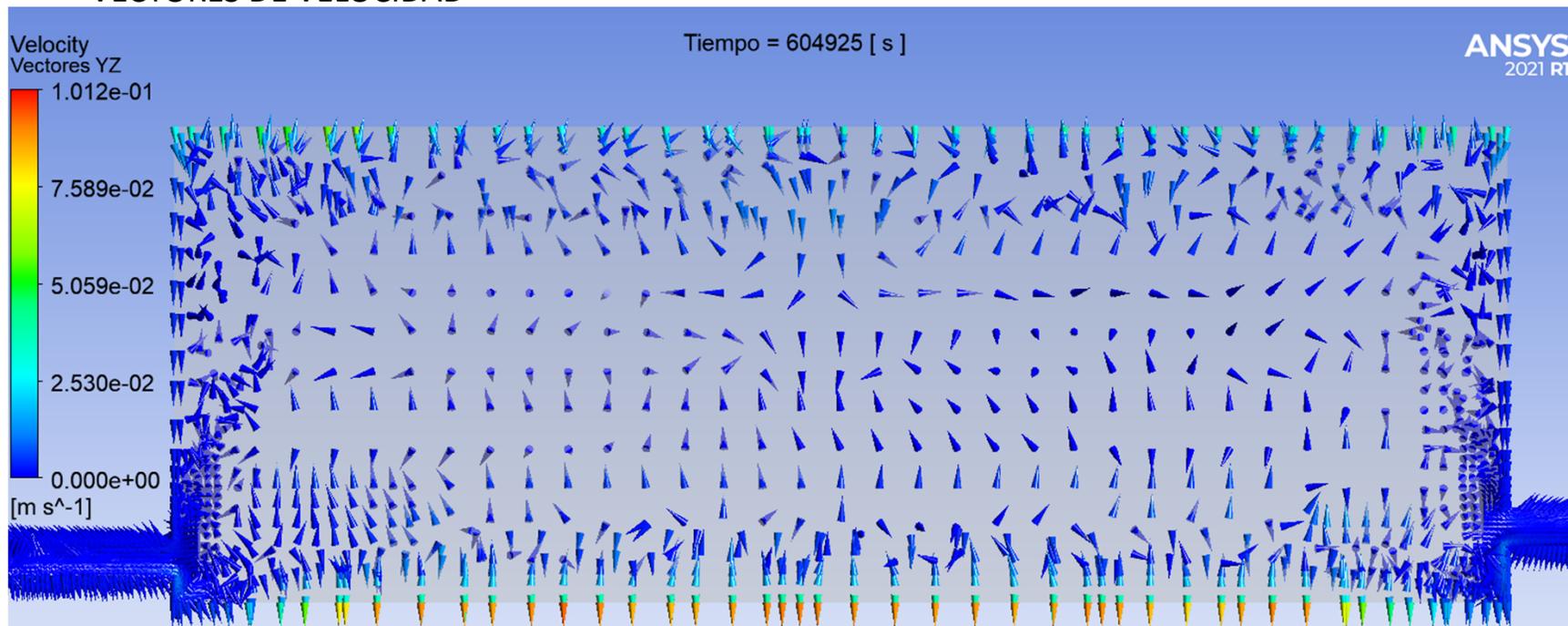
Número de Nusselt vs Tiempo



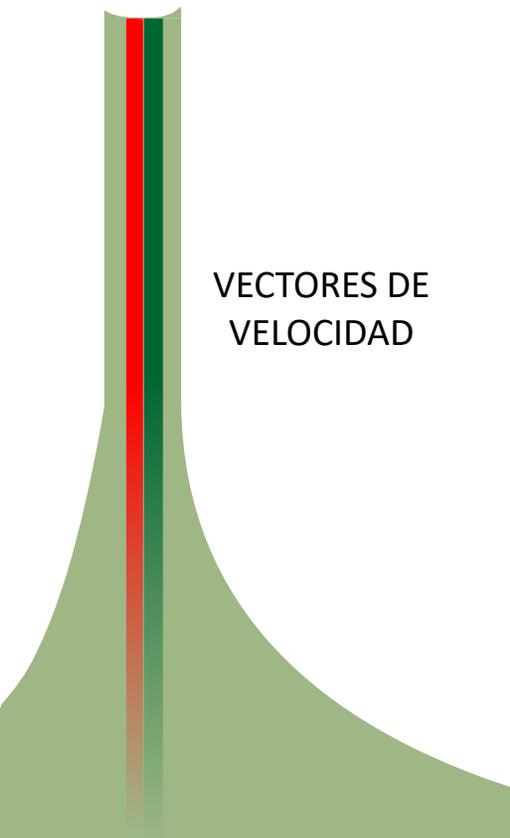
$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

## ENFRIAMIENTO

### VECTORES DE VELOCIDAD

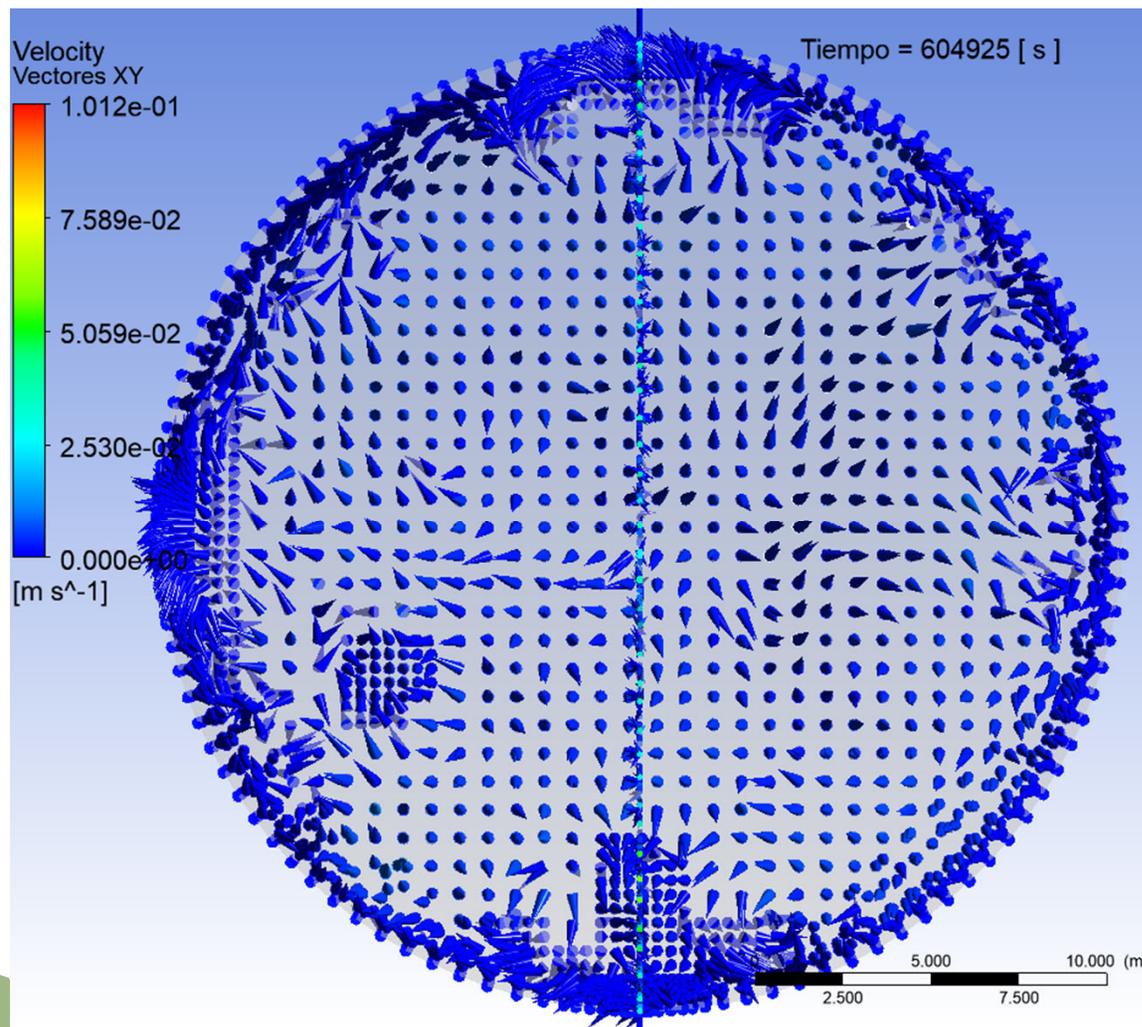


## ENFRIAMIENTO



VECTORES DE VELOCIDAD

## RESULTADOS



Sección cortada a 2.3 [m]  
de altura con respecto a la  
base del tanque

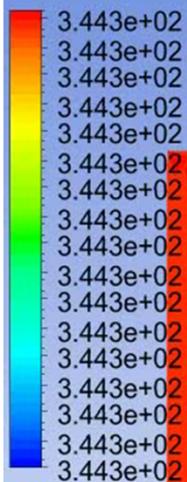
## VIDEO DEL ENFRIAMIENTO DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE EN UN LAPSO DE 7 DÍAS

ENFRIAMIENTO

Temperature  
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 50 [ s ]

ANSYS  
2021 R1



[K]





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## RESULTADOS

### CALENTAMIENTO CASO A

DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
INICIAL

Temperature  
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 50 [ s ]

ANSYS  
2021 R1

3.449e+02  
3.448e+02  
3.446e+02  
3.444e+02  
3.442e+02  
3.440e+02  
3.438e+02  
3.437e+02  
3.435e+02  
3.433e+02  
3.431e+02  
3.429e+02  
3.427e+02  
3.426e+02  
3.424e+02  
3.422e+02  
3.420e+02

[K]



DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL

Temperature  
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 86400 [ s ]

ANSYS  
2021 R1

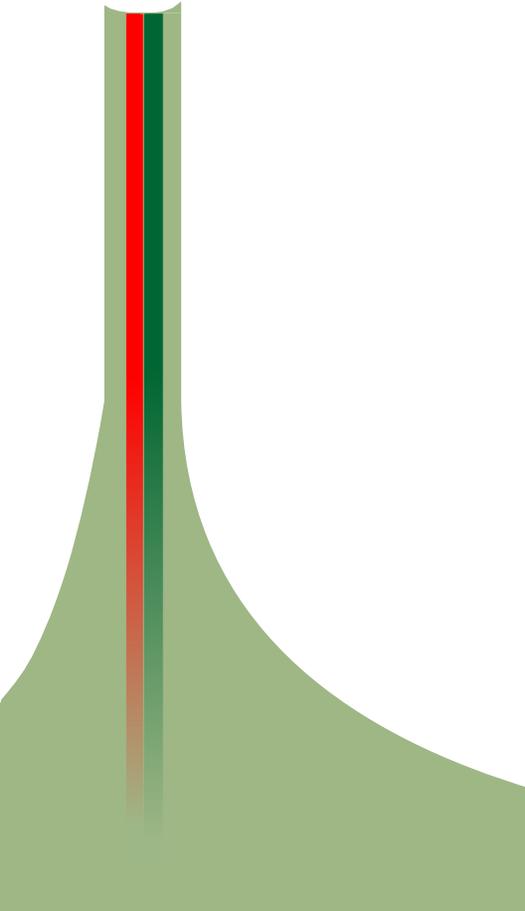
3.449e+02  
3.448e+02  
3.446e+02  
3.444e+02  
3.442e+02  
3.440e+02  
3.438e+02  
3.437e+02  
3.435e+02  
3.433e+02  
3.431e+02  
3.429e+02  
3.427e+02  
3.426e+02  
3.424e+02  
3.422e+02  
3.420e+02

[K]



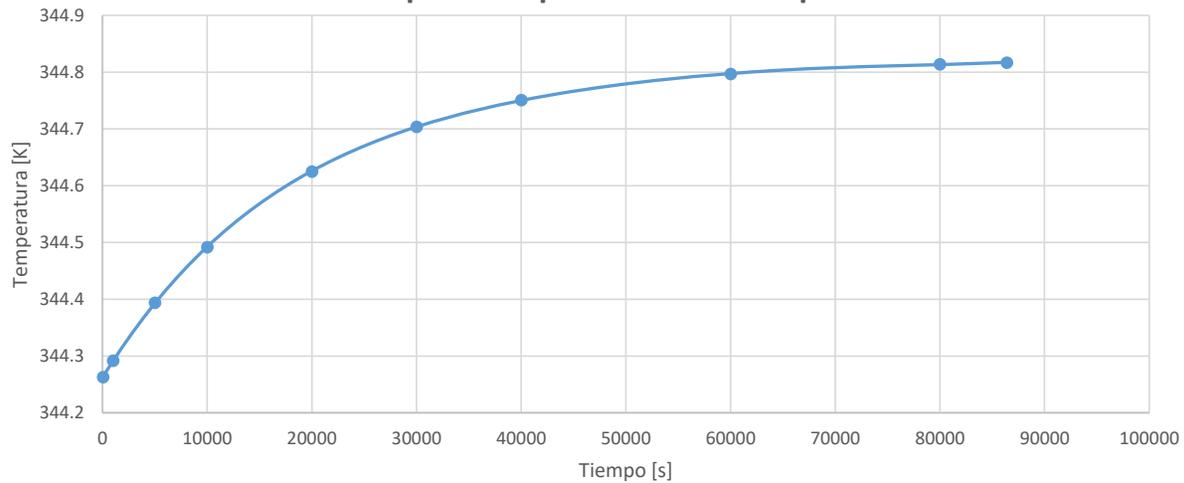


**CALENTAMIENTO  
CASO A**

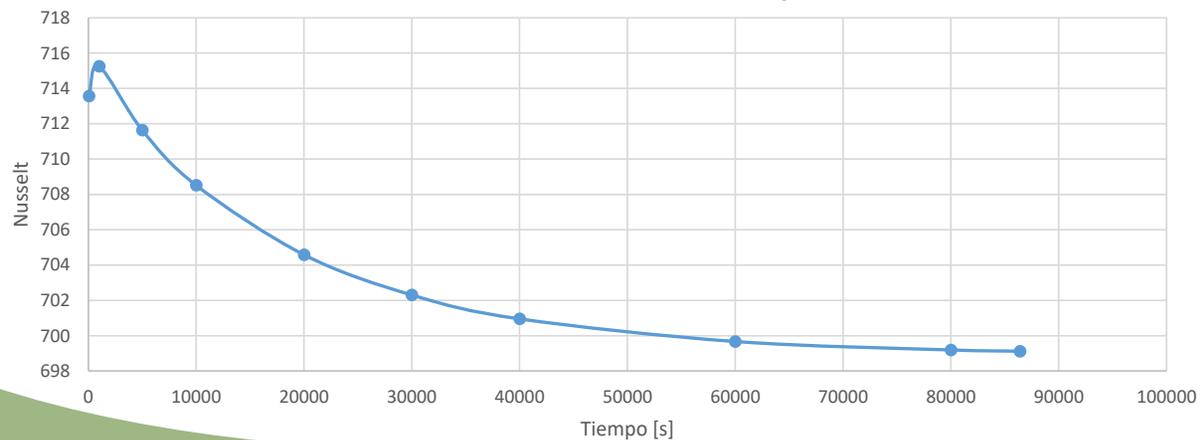


**RESULTADOS**

Temperatura promedio vs Tiempo



Número de Nusselt vs Tiempo



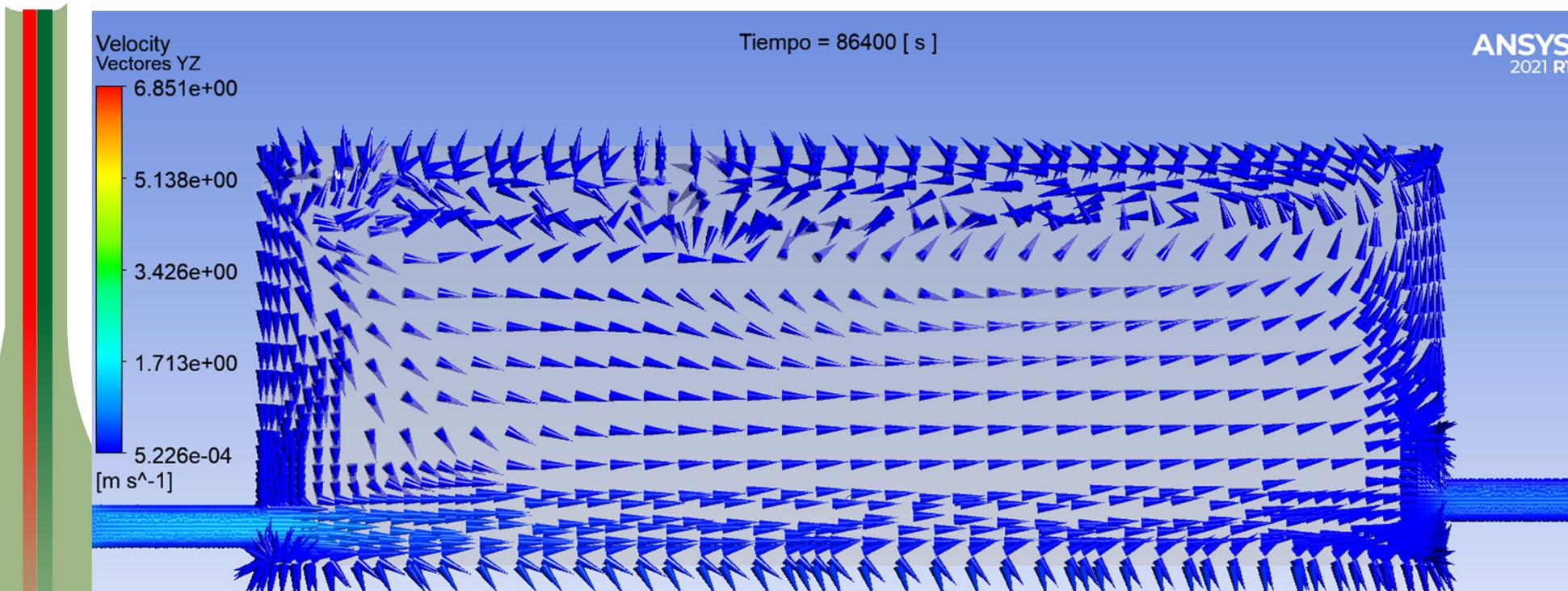
$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

## RESULTADOS

CALENTAMIENTO

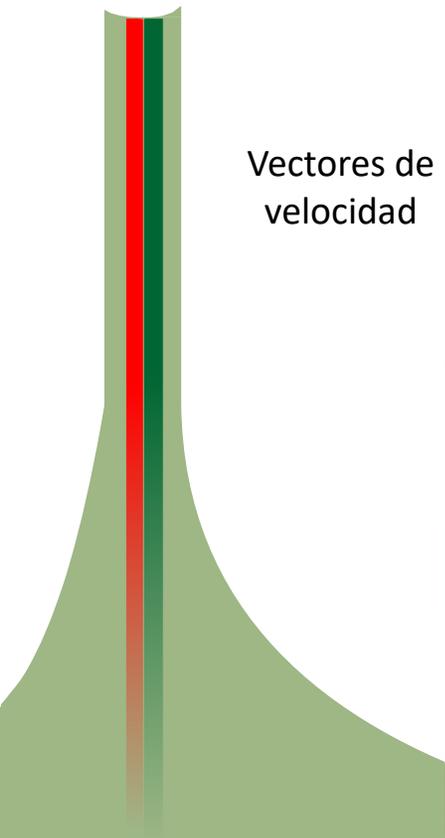
Vectores de velocidad

CASO A

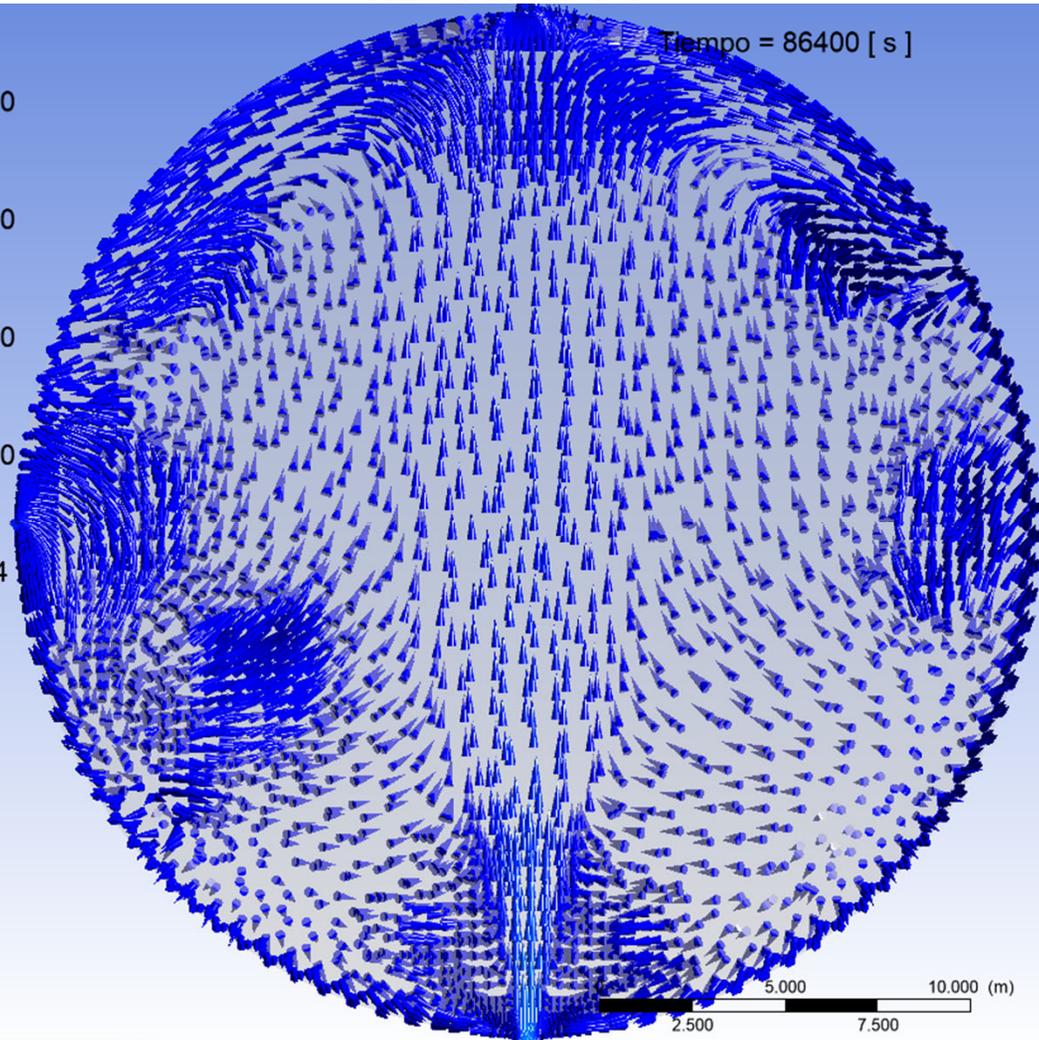
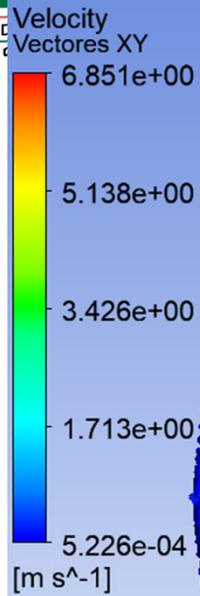


## RESULTADOS

### CALENTAMIENTO CASO A



Vectores de  
velocidad

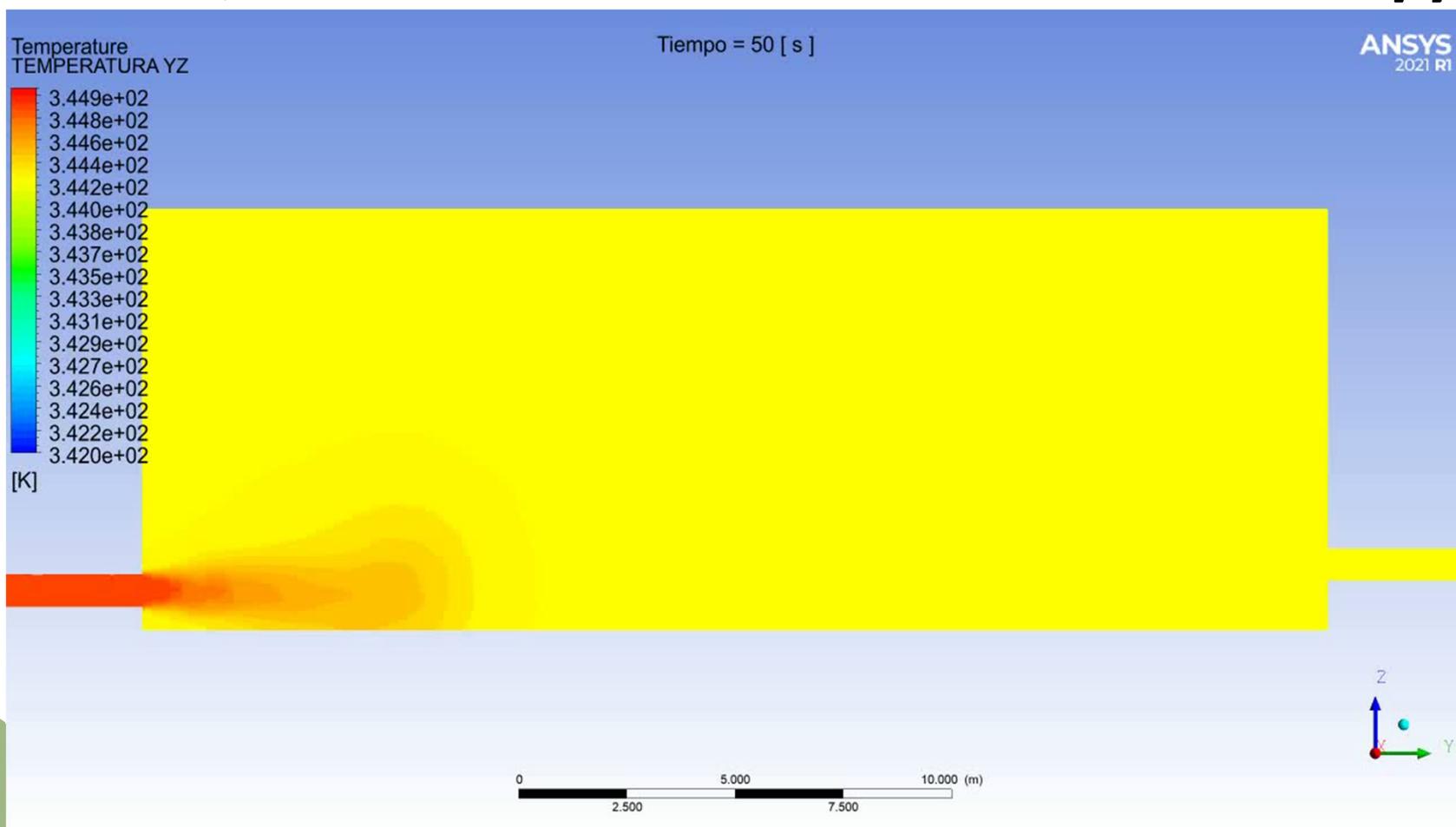


Sección cortada a 1.2 [m]  
de altura con respecto a la  
base del tanque



# VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO A DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

## CALENTAMIENTO CASO A





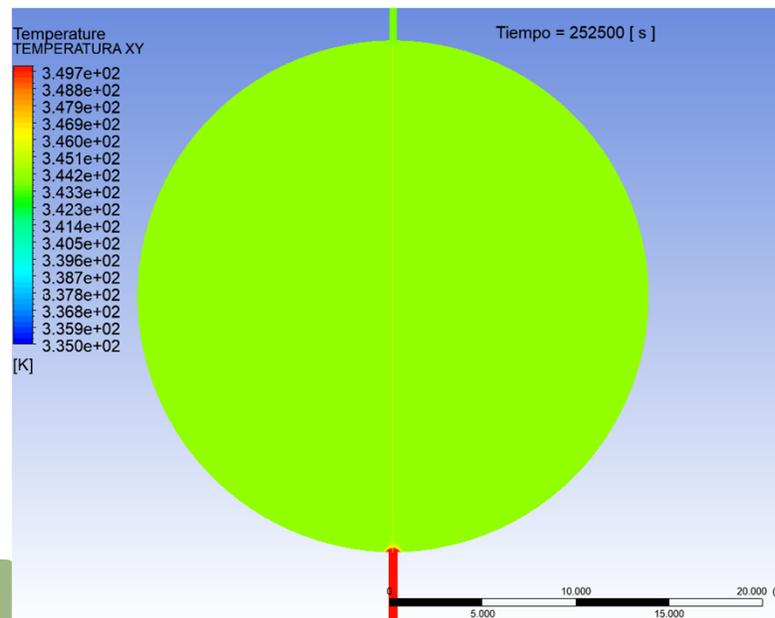
## RESULTADOS



### CALENTAMIENTO CASO B1

DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL

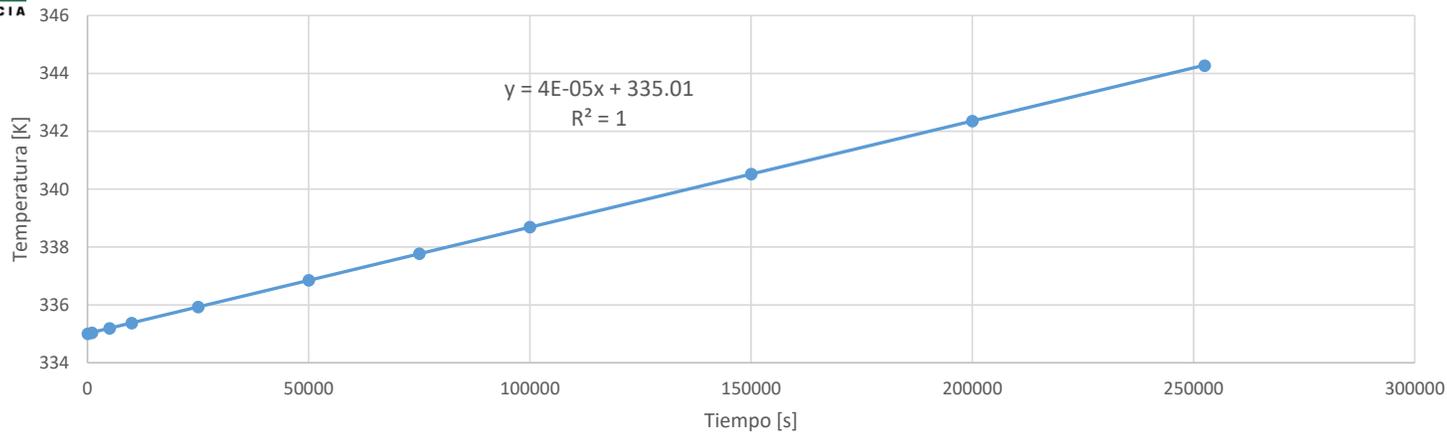
DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL



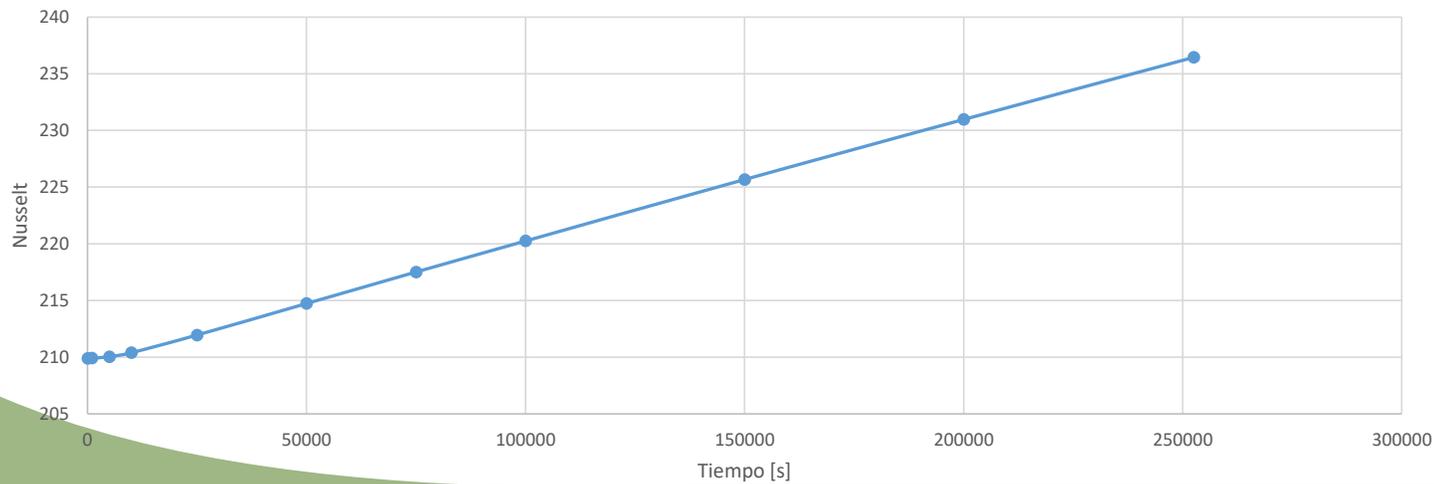
Sección cortada a 1.2  
[m] de altura desde la  
base del tanque

## RESULTADOS

### Temperatura promedio - Tiempo

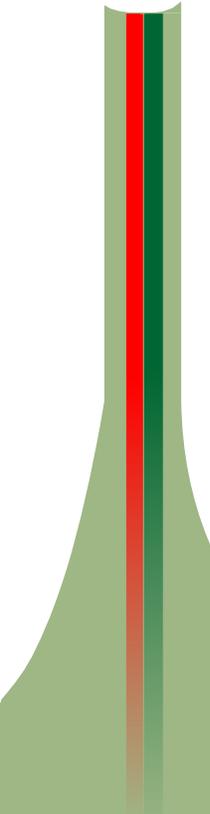


### Número de Nusselt vs Tiempo



$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

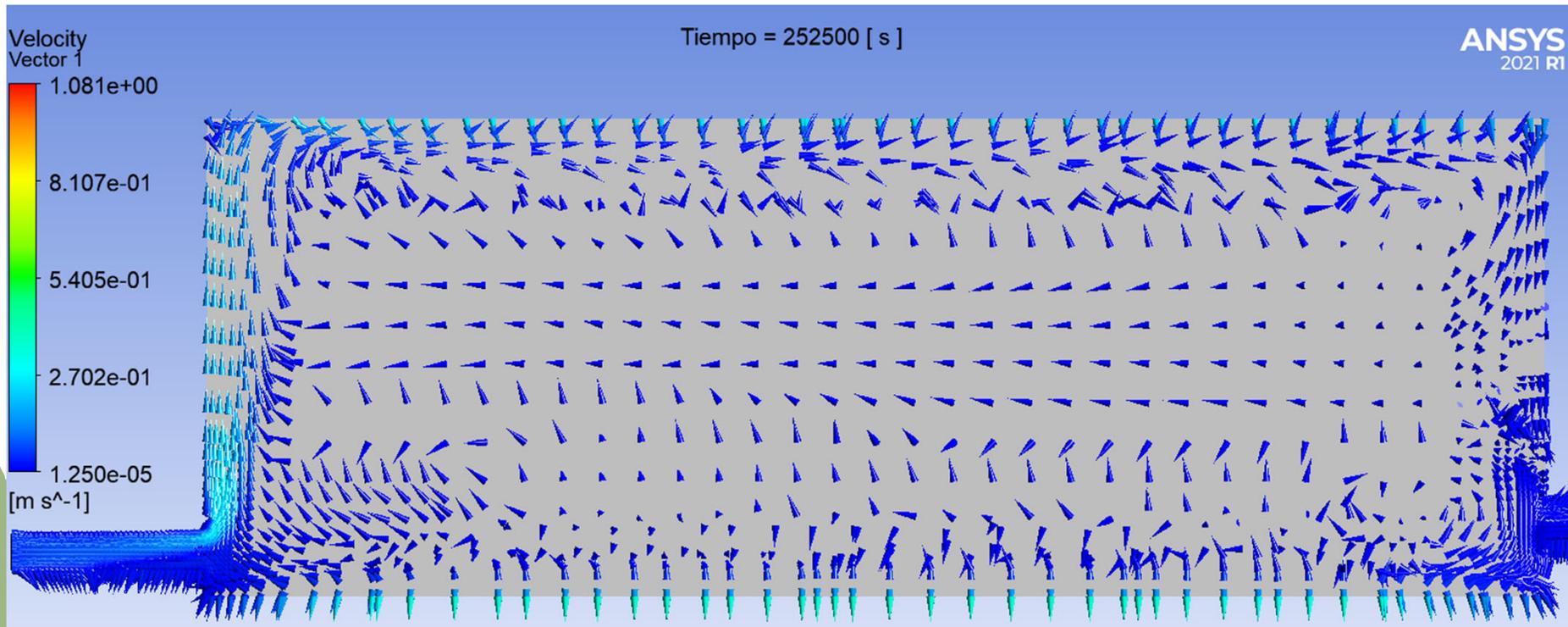
## CALENTAMIENTO CASO B1



# RESULTADOS

## CALENTAMIENTO CASO B1

Vectores de velocidad





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

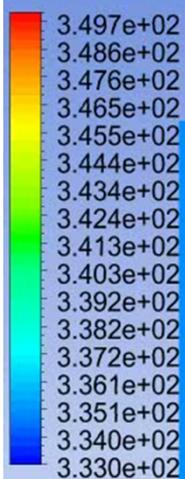
# VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B1 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO  
CASO B1

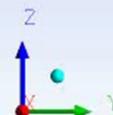
Temperature  
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 50 [ s ]

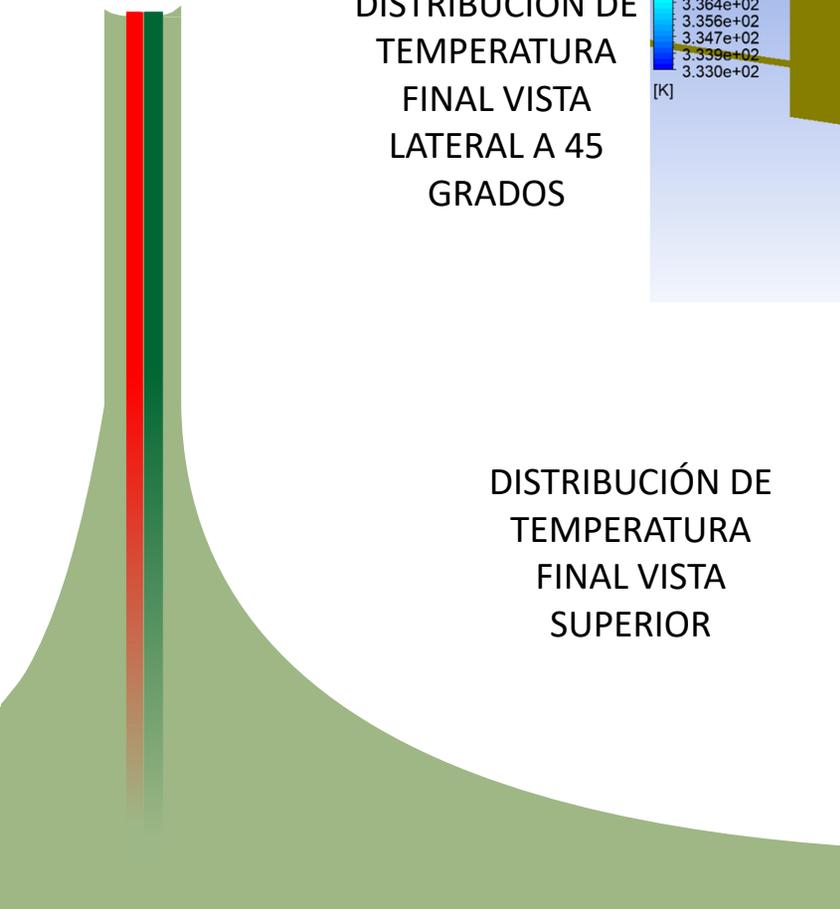
ANSYS  
2021 R1



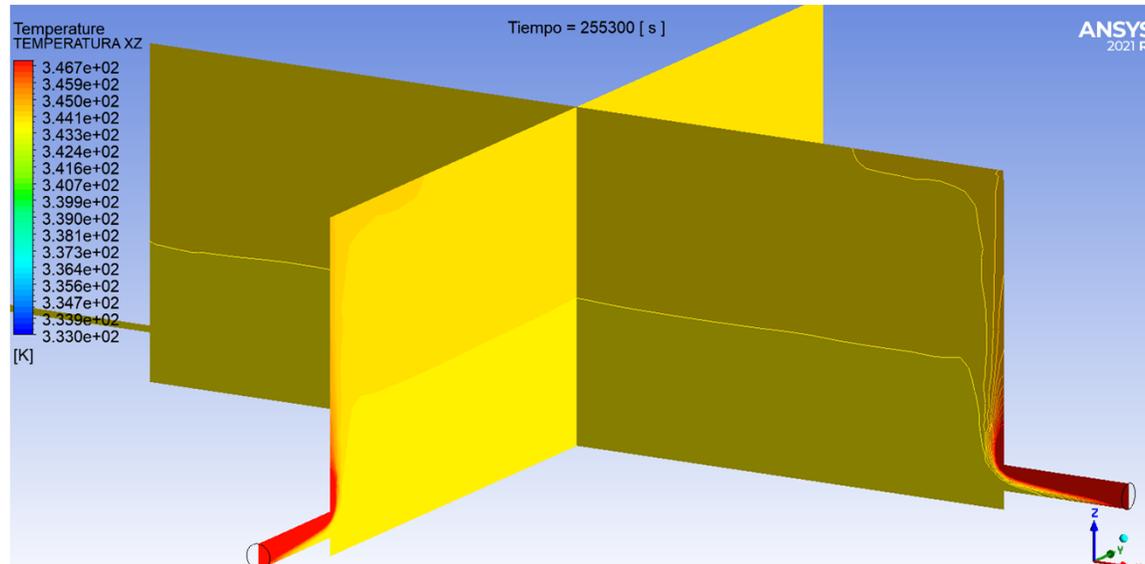
[K]



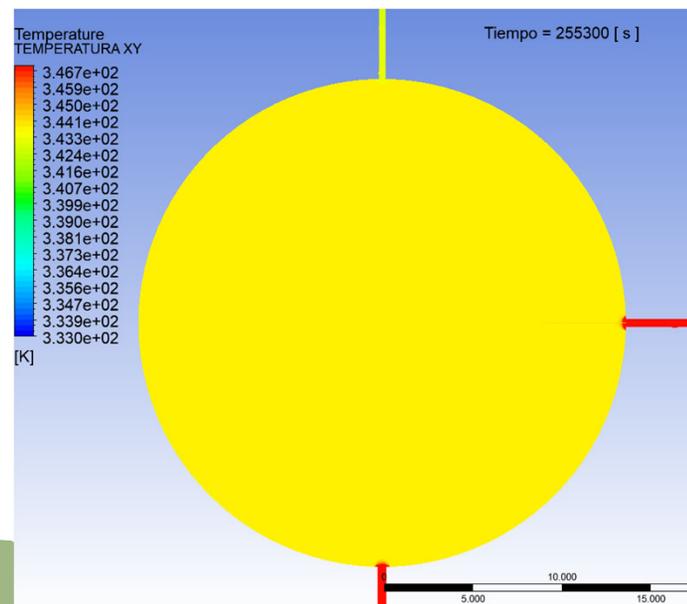
**CALENTAMIENTO  
CASO B2**



DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL VISTA  
LATERAL A 45  
GRADOS

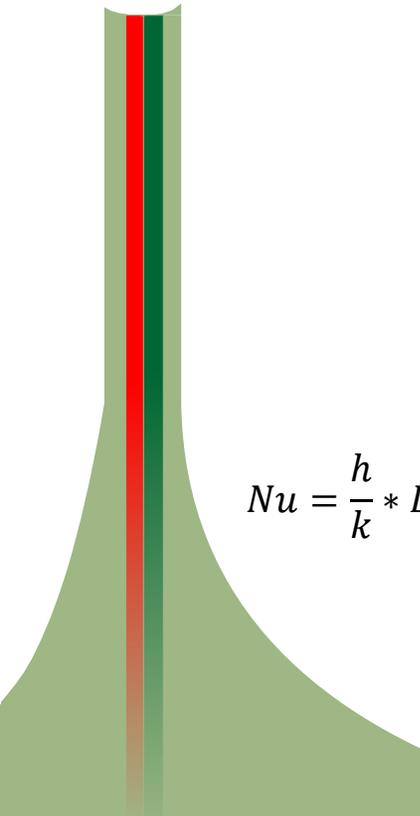


DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL VISTA  
SUPERIOR



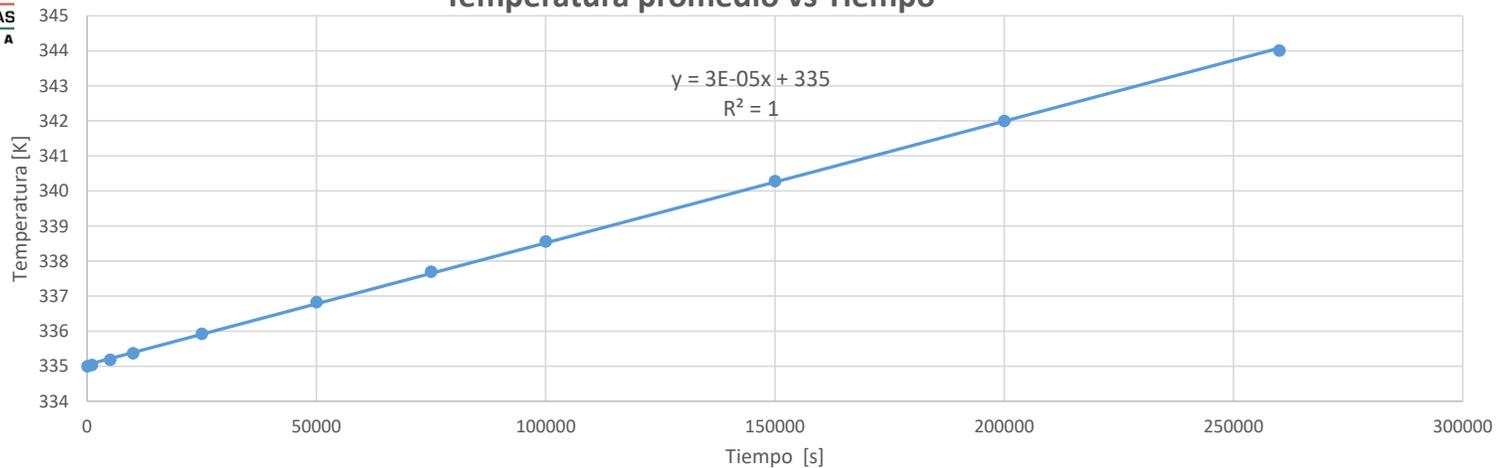
Sección cortada a 1.2  
[m] de altura desde la  
base del tanque

**CALENTAMIENTO  
CASO B2**

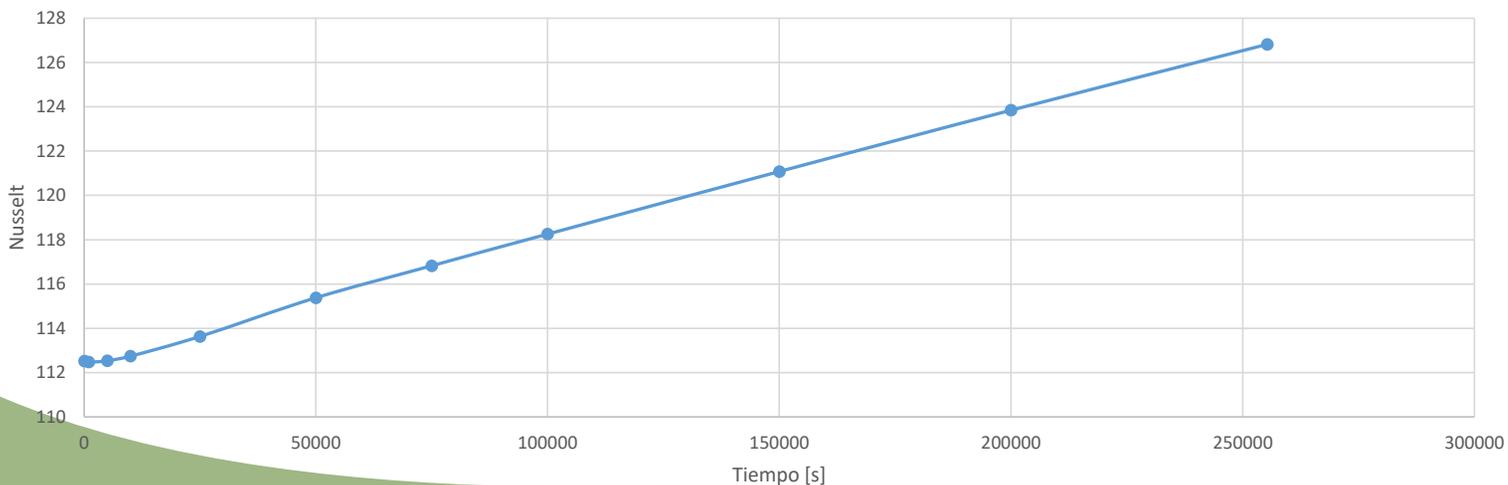


$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

**RESULTADOS**  
Temperatura promedio vs Tiempo



Número de Nusselt vs Tiempo





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

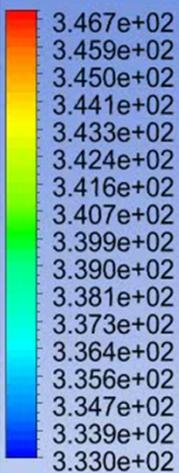
## VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B2 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO  
CASO B2

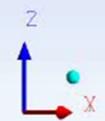
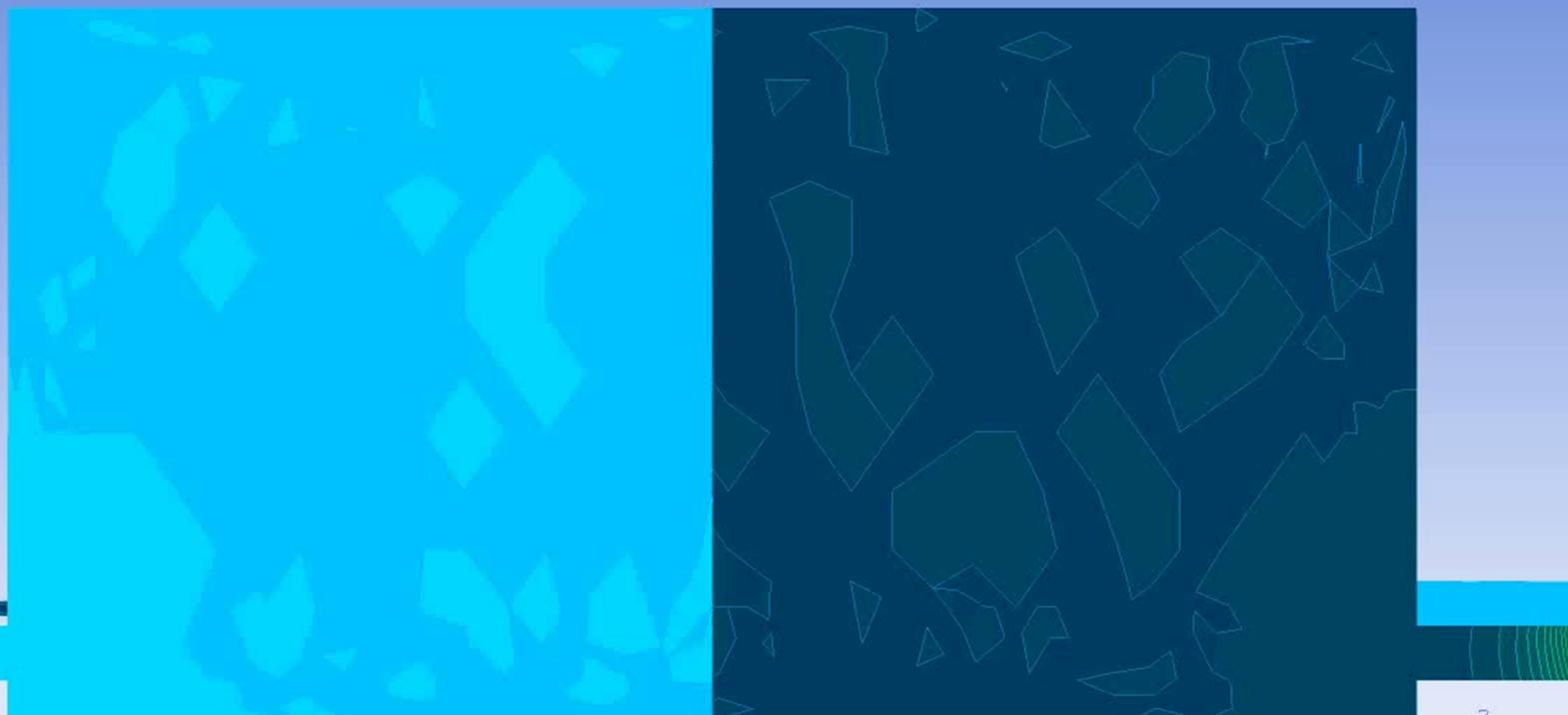
Temperature  
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 25 [ s ]

ANSYS  
2021 R1



[K]

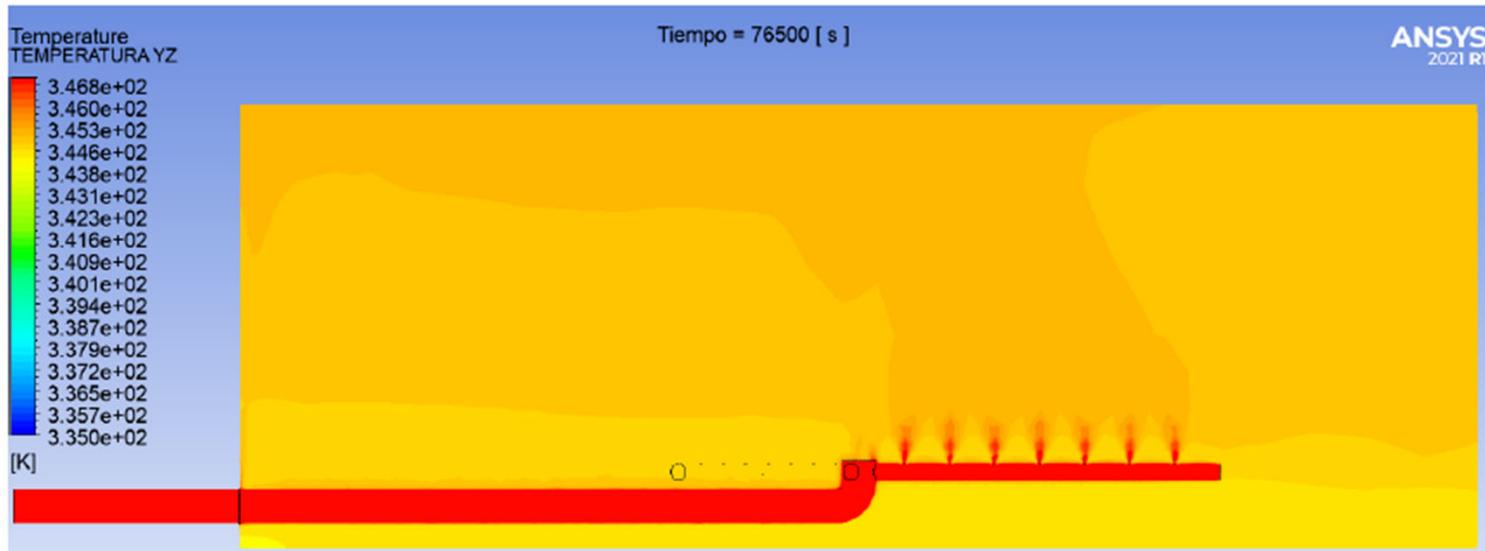




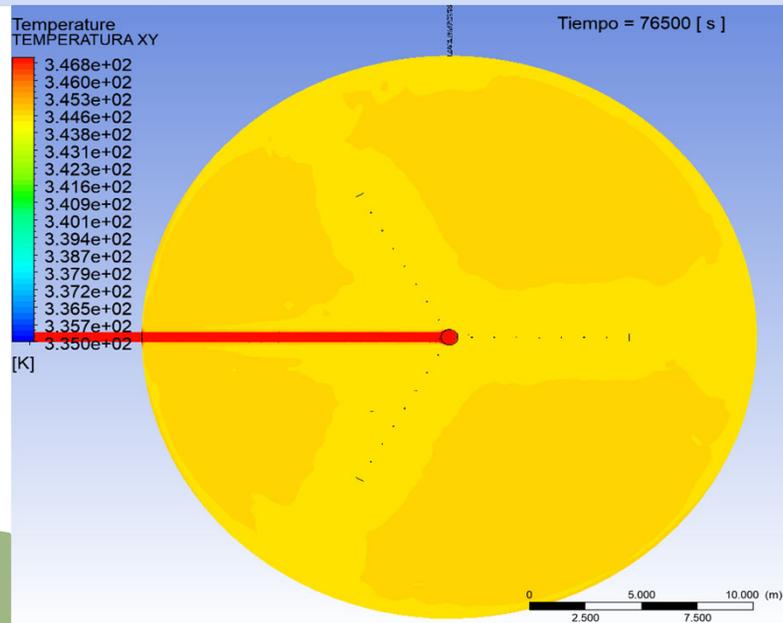
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

### CALENTAMIENTO CASO B3

DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL VISTA  
LATERAL

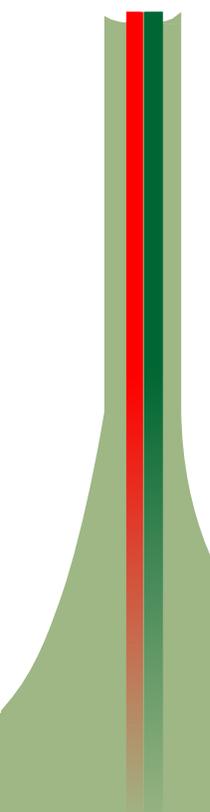


DISTRIBUCIÓN DE  
TEMPERATURA  
FINAL VISTA  
SUPERIOR



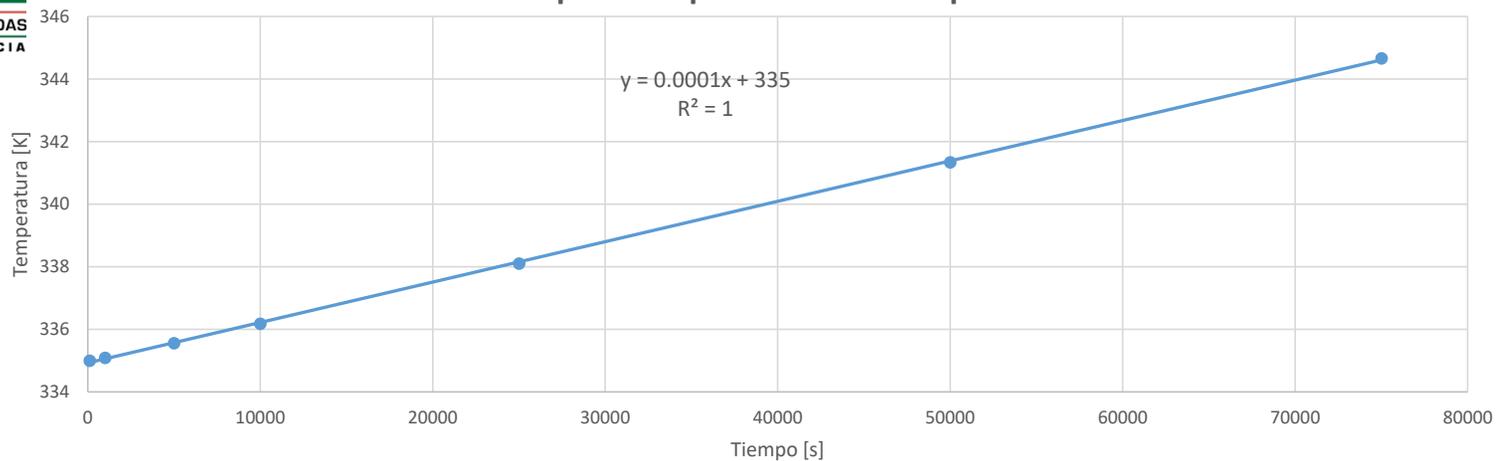
Sección cortada a 1.2 [m]  
de altura con respecto a la  
base del tanque

**CALENTAMIENTO  
CASO B3**

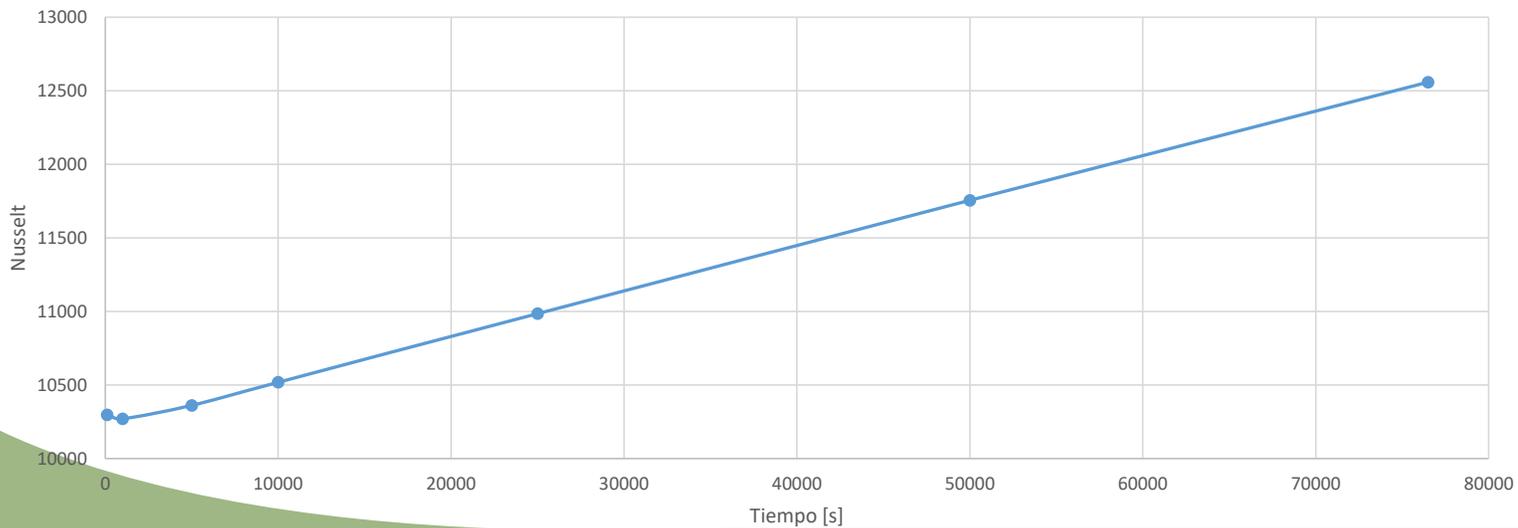


$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

**RESULTADOS**  
Temperatura promedio vs Tiempo

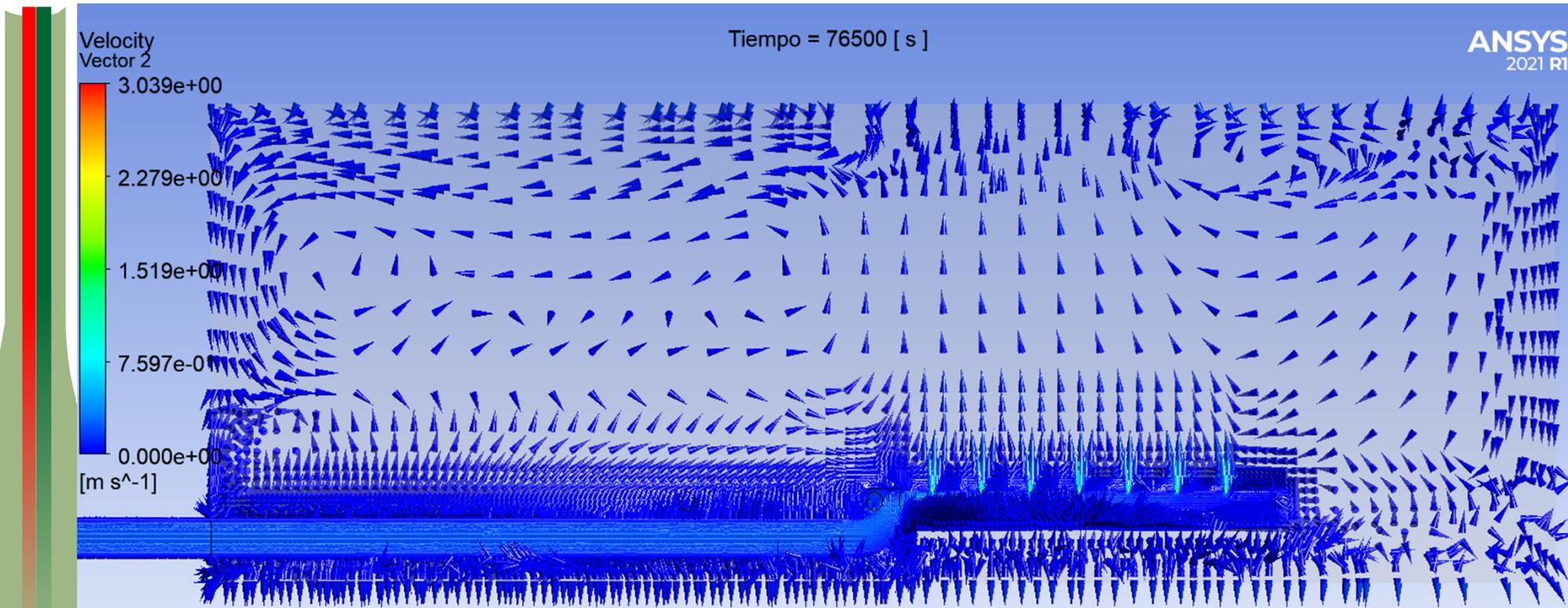


**Número de Nusselt vs Tiempo**



## CALENTAMIENTO CASO B3

## VECTORES DE VELOCIDAD

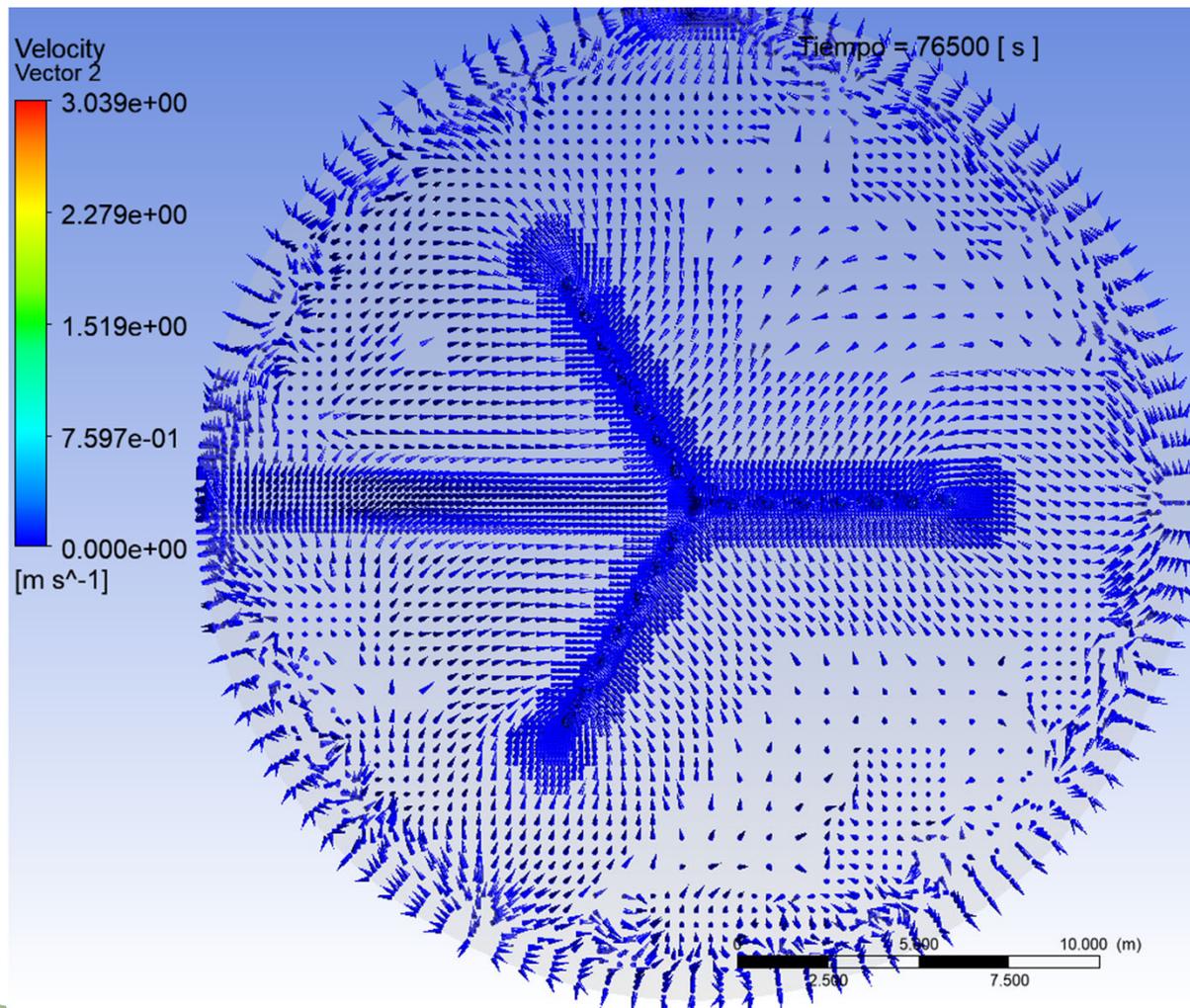


**CALENTAMIENTO  
CASO B3**

VECTORES DE  
VELOCIDAD

Sección cortada a 2.2 [m]  
de altura con respecto a la  
base del tanque

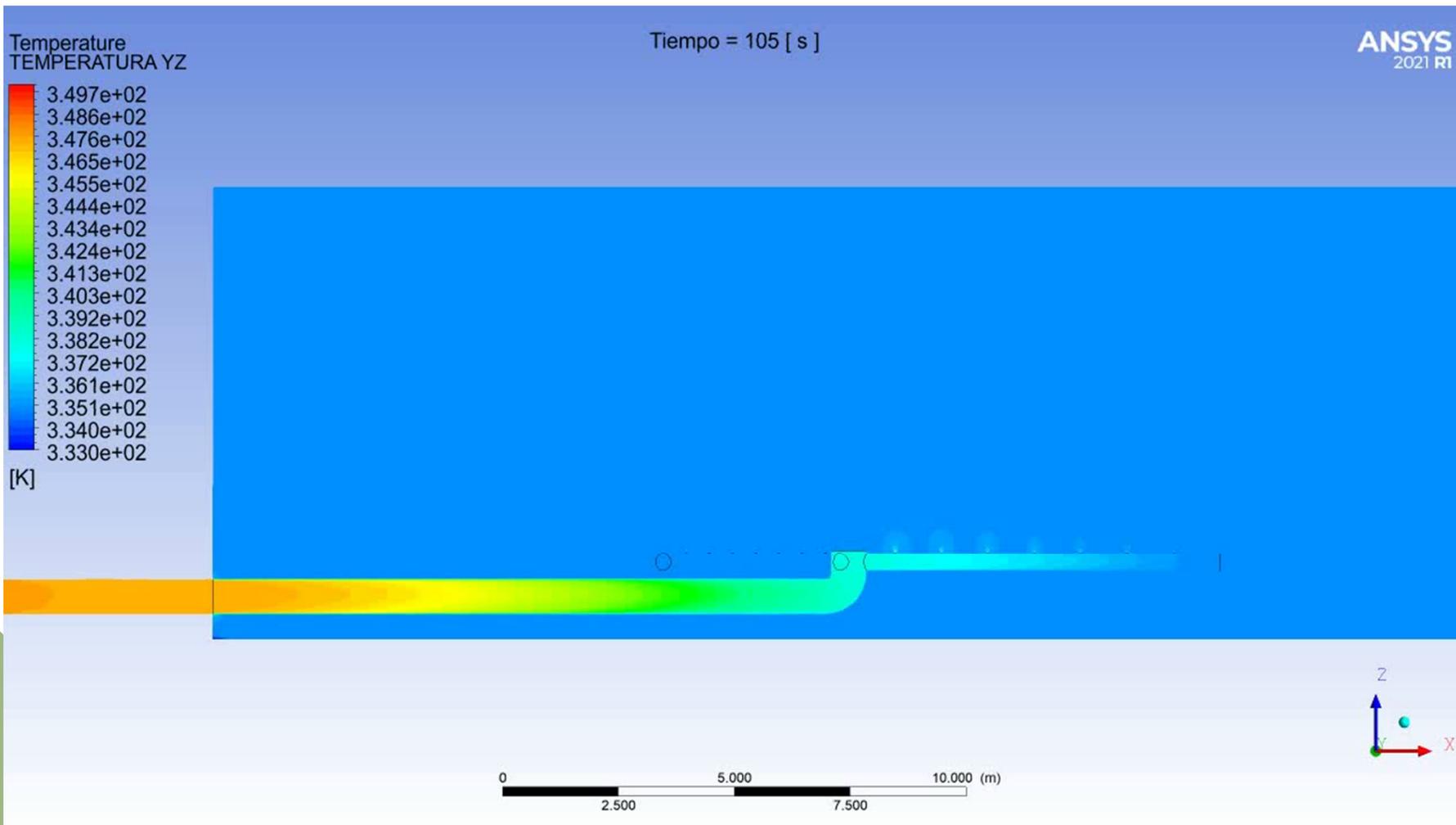
**RESULTADOS**





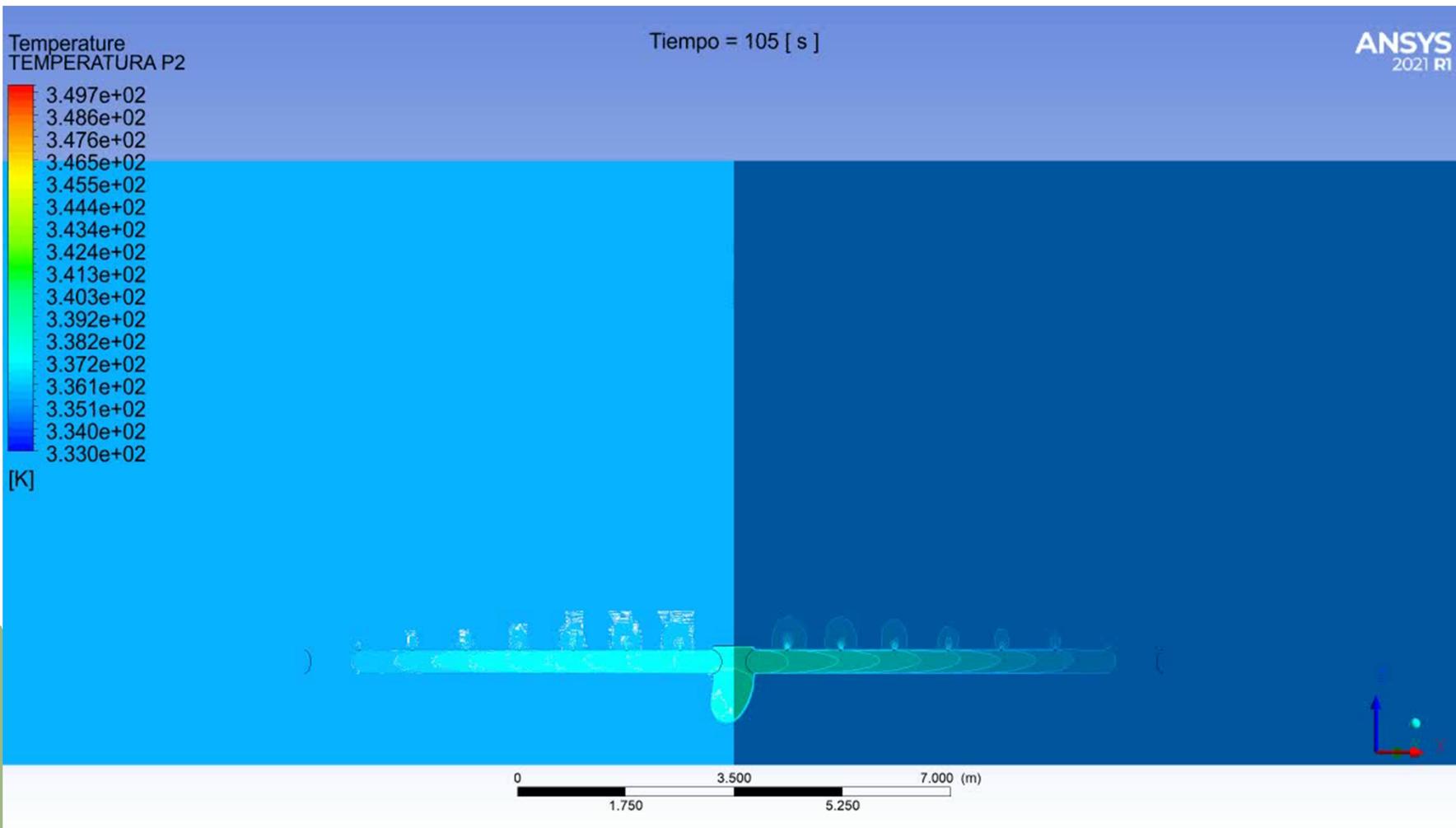
# VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B3 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO  
CASO B3



# VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B3 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO  
CASO B3

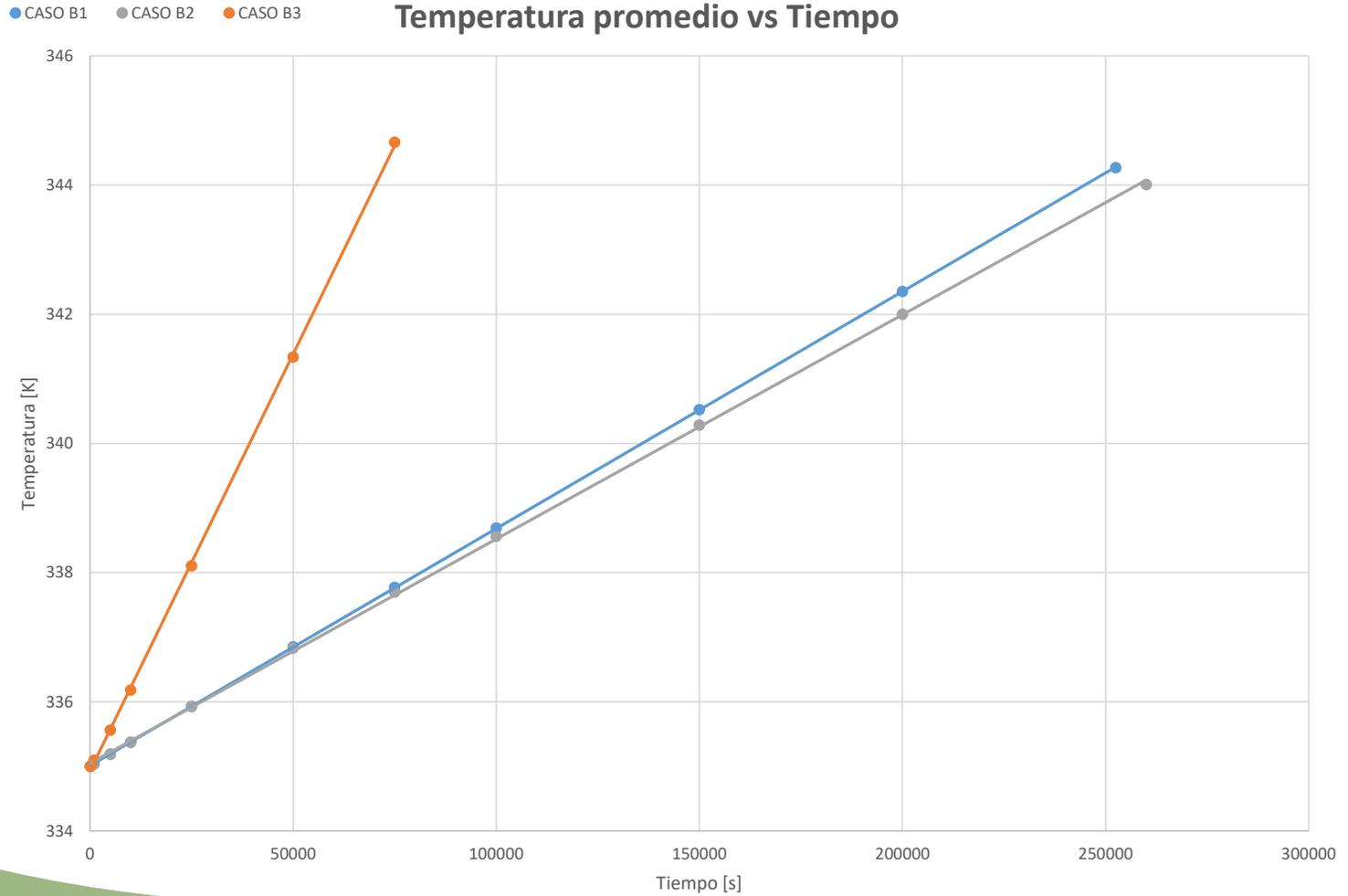


## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

B1: Curva con una entrada  
B2: Curva con dos entradas  
B3: Curva con difusor radial

## RESULTADOS

Temperatura promedio vs Tiempo





## RESULTADOS

### FLUJO MÁSICO DE CRUDO

$$\begin{aligned} \dot{m}_{int} &= Q_{int} * \rho \\ \dot{m}_{int} &= 12500 \left[ \frac{\text{barriles}}{\text{dia}} \right] * 934 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \\ \dot{m}_{int} &= 21.48 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \end{aligned}$$

### BALANCE ENERGÉTICO EN EL INTERCAMBIADOR

$$\begin{aligned} \dot{m}_{int} * C_{p_{int}} * \Delta T_{int} &= \dot{m}_{vap} * C_{p_{vap}} * \Delta T_{vap} \\ \dot{m}_{vap} &= \frac{21.48 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * 1970 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right] * (344 - 335)[K]}{4279 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right] * (420.93 - 408.36)[K]} \\ \dot{m}_{vap} &= 7.08 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \end{aligned}$$

### CALOR NECESARIO PARA CONSEGUIR EL VAPOR

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 7.08 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \\ \dot{Q} &= \dot{m} * C_p * \Delta T \\ \dot{Q} &= 7.08 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * 2.016 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right] * (420 - 348)[K] \\ \dot{Q} &= 1027.7 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] \end{aligned}$$

### ENERGÍA DISPONIBLE SI SE UTILIZA BÚNKER

$$\begin{aligned} PCI &= 41.5 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad \rho = 994.9 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \\ 1[\text{m}^3] &= 264.172 [\text{Gal}] \\ PCI &= 156.3 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Gal}} \right] \end{aligned}$$

### CONSUMO POR SEGUNDO

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= \frac{\dot{Q}}{PCI} = \frac{1027.7 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]}{156.3 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Gal}} \right]} = 6.57 \left[ \frac{\text{Gal}}{\text{s}} \right] \\ \text{Considerando que } 1 [\text{Gal}] &= \$ 2.04 \\ \text{Costo} &= 13.40 \left[ \frac{\$}{\text{s}} \right] \end{aligned}$$



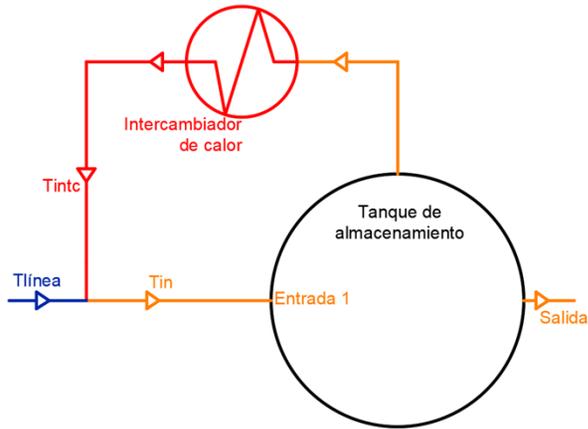
**CASO A**

Calentamiento hasta estabilizar la temperatura del crudo

Tiempo = 86400 [s]

$$\text{Costo} = 13.40 \left[ \frac{\$}{s} \right] * 86400[s]$$

*Costo = \$ 1 157 760*



**RESULTADOS**

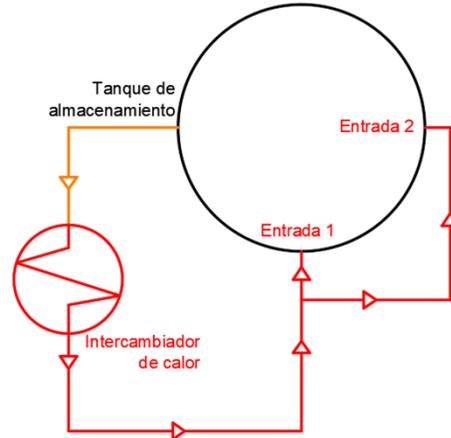
**CASO B1 y B2**

Calentamiento desde 335 [K] con una y dos entradas

Tiempo = 250000 [s]

$$\text{Costo} = 13.40 \left[ \frac{\$}{s} \right] * 250000[s]$$

*Costo = \$ 3 350 000*



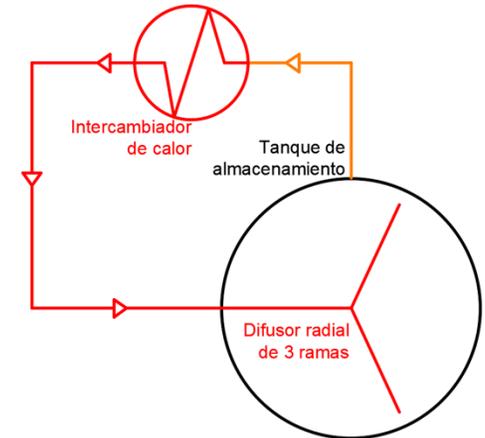
**CASO B3**

Calentamiento desde 335 [K] con difusor radial

Tiempo = 75000 [s]

$$\text{Costo} = 13.40 \left[ \frac{\$}{s} \right] * 76500[s]$$

*Costo = \$ 1 025 100*

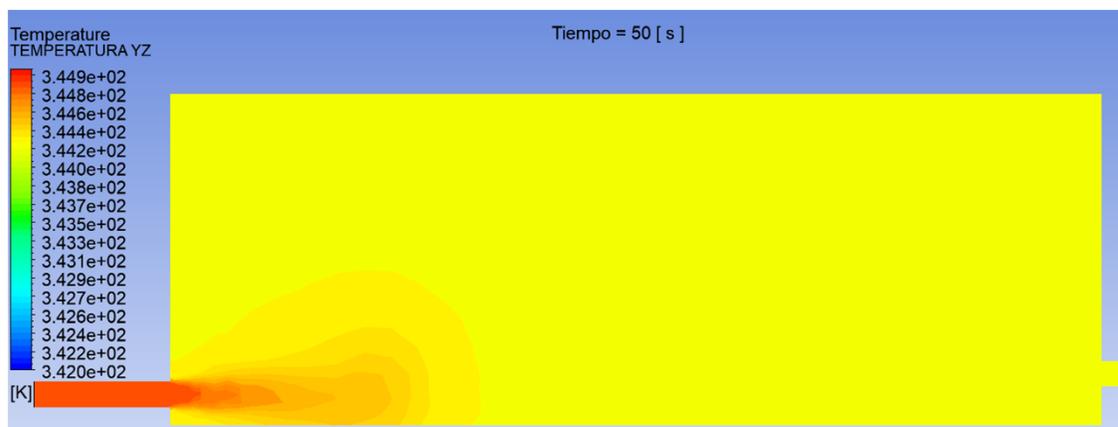






## CONCLUSIONES

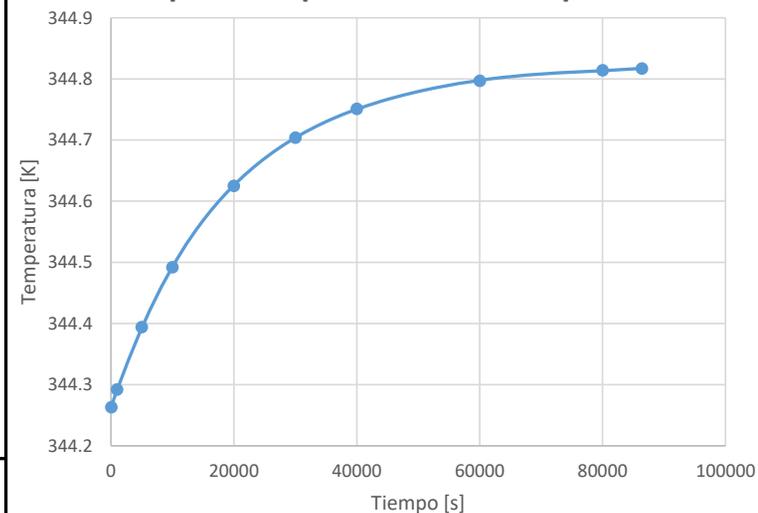
Distribución de temperatura inicial del crudo



Distribución de temperatura del crudo luego de 86400 segundos (1 día)



Temperatura promedio vs Tiempo

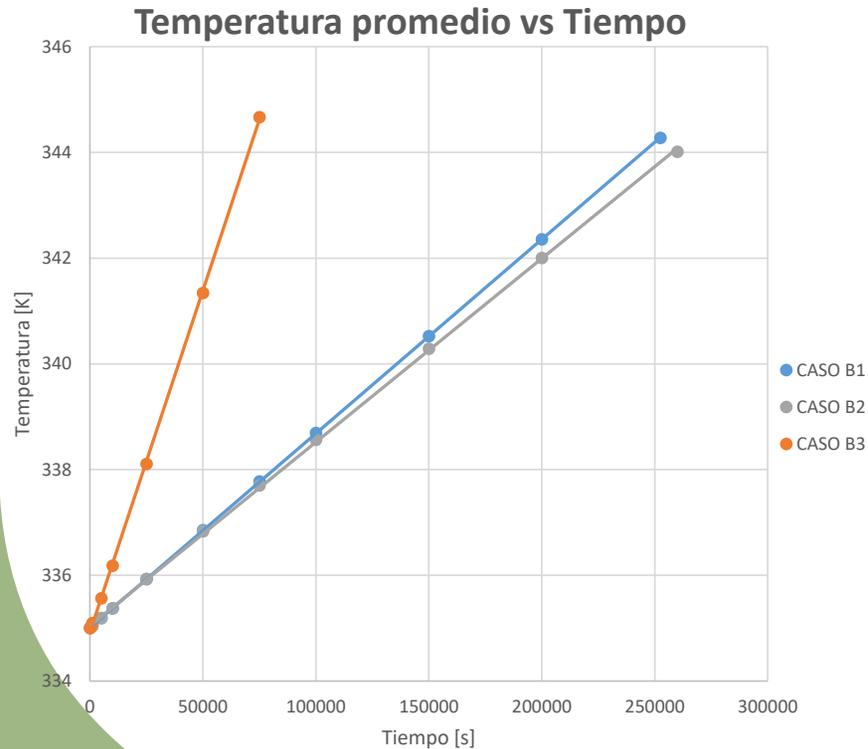


CASO A

Calentamiento hasta estabilizar la temperatura del crudo

**Costo = \$ 1 157 760**

## CONCLUSIONES



CASO B3

Calentamiento desde 335 [K] con difusor radial

$$\text{Costo} = \$1\,025\,100$$

CASO B1 y B2

Calentamiento desde 335 [K] con una y dos entradas

$$\text{Costo} = \$3\,350\,000$$

Reducción de tiempo

$$\text{Tiempo} = \frac{76500[s]}{250000[s]} = 30.6\%$$

Reducción de costo

$$\text{Diferencia de costo} = \$3\,350\,000 - \$1\,025\,100$$

$$\text{Diferencia de costo} = \$2\,324\,900$$