

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 [m³].

Representa un ahorro energético y económico.

Enfriamiento

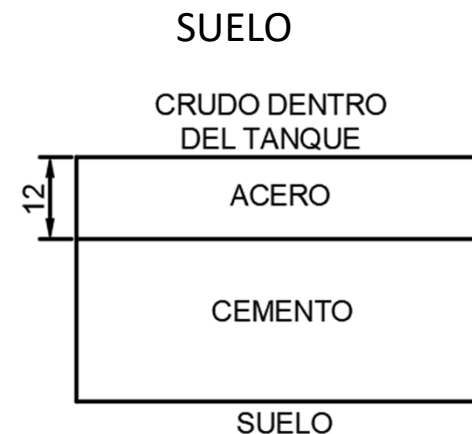
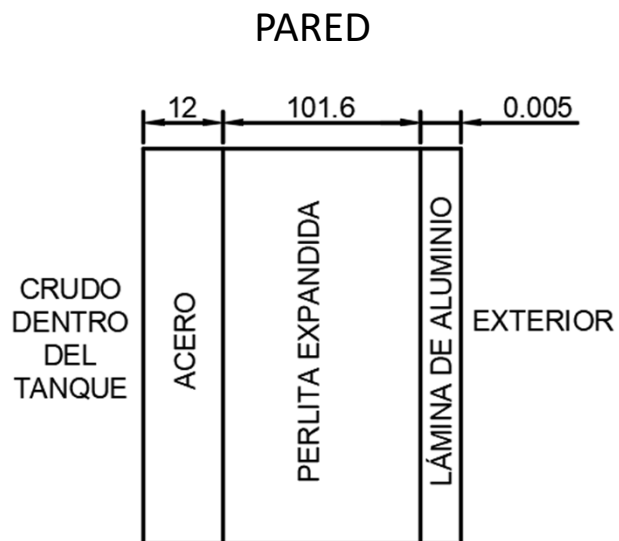
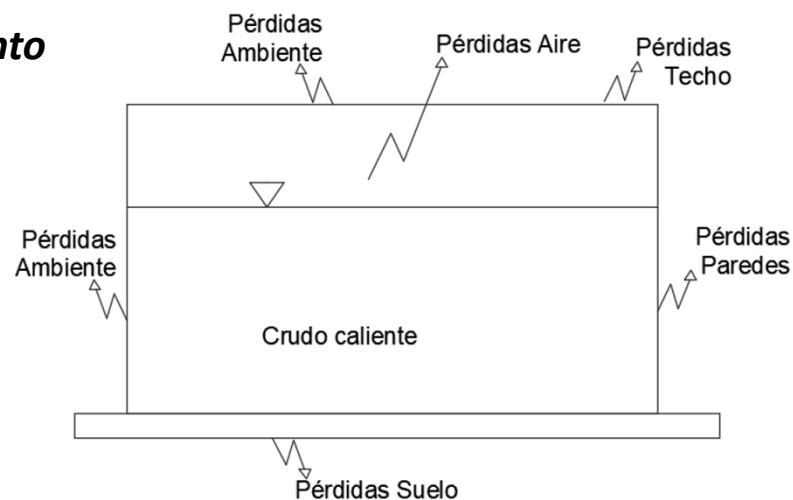
$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

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

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

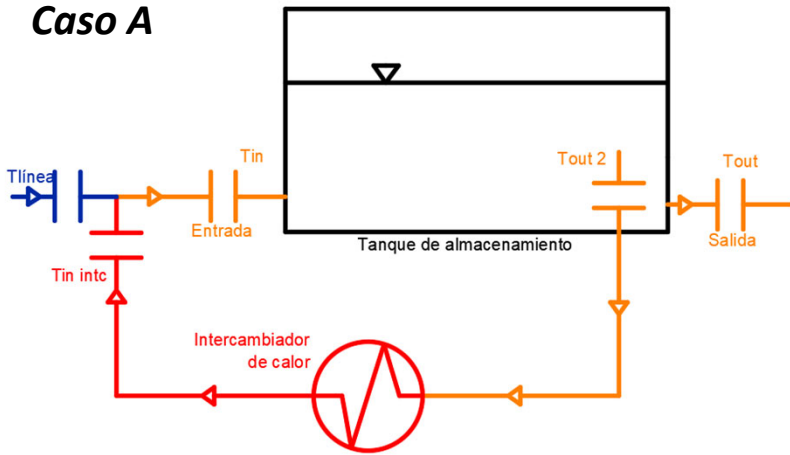
$$q = h_{ext} * (T_{ext} - T_w)$$

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

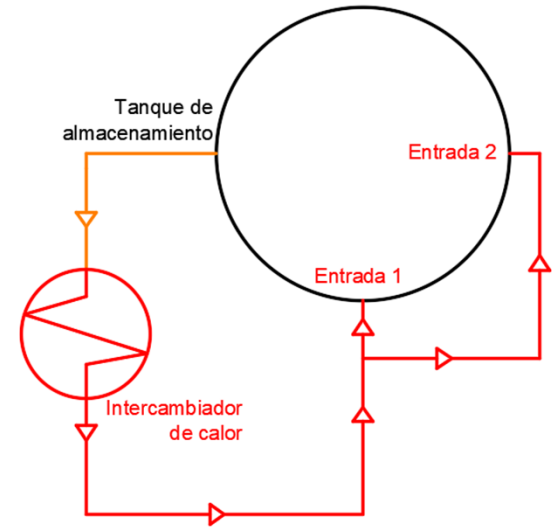


Calentamiento

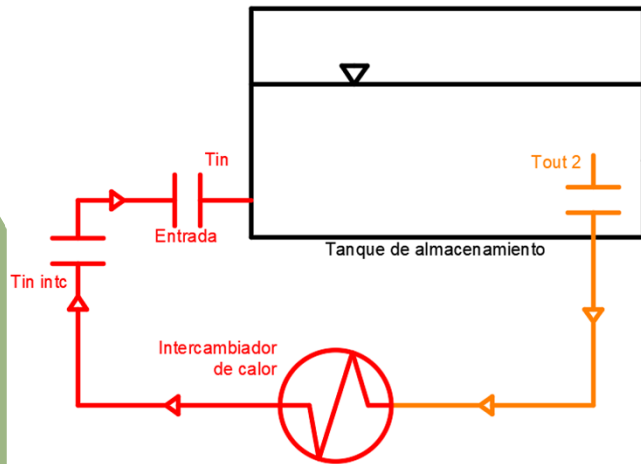
Caso A



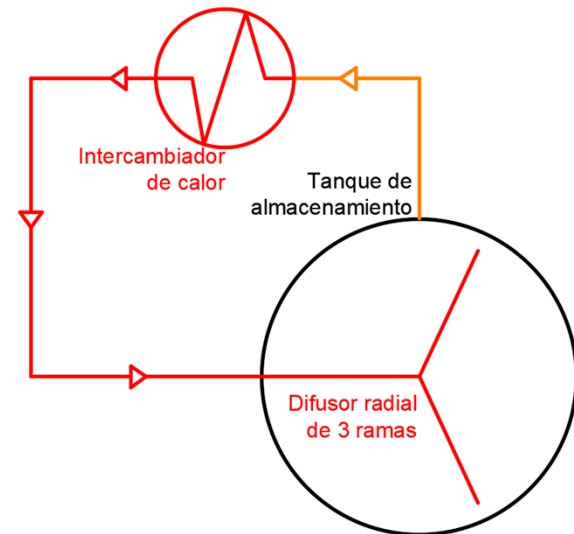
Caso B2



Caso B1



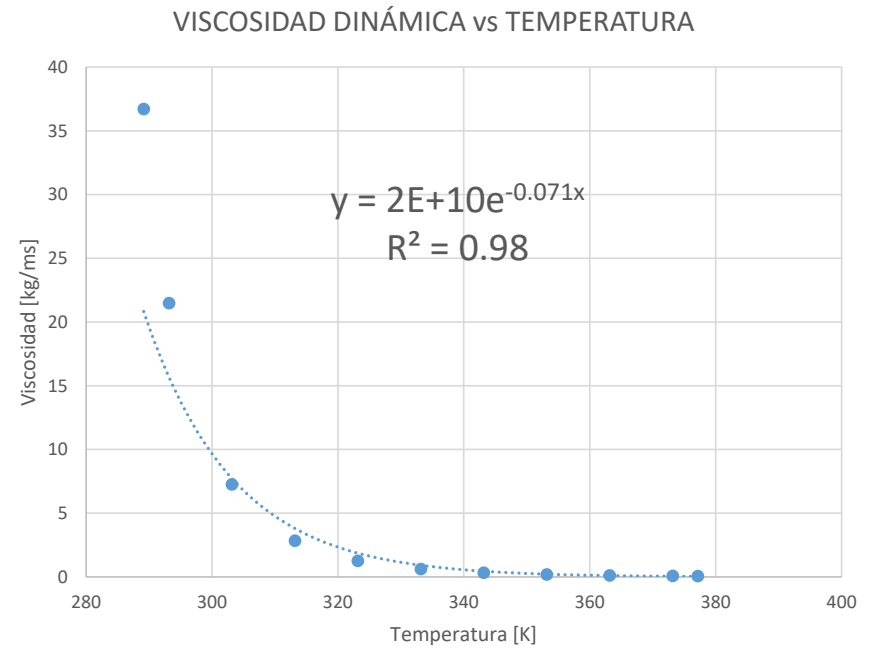
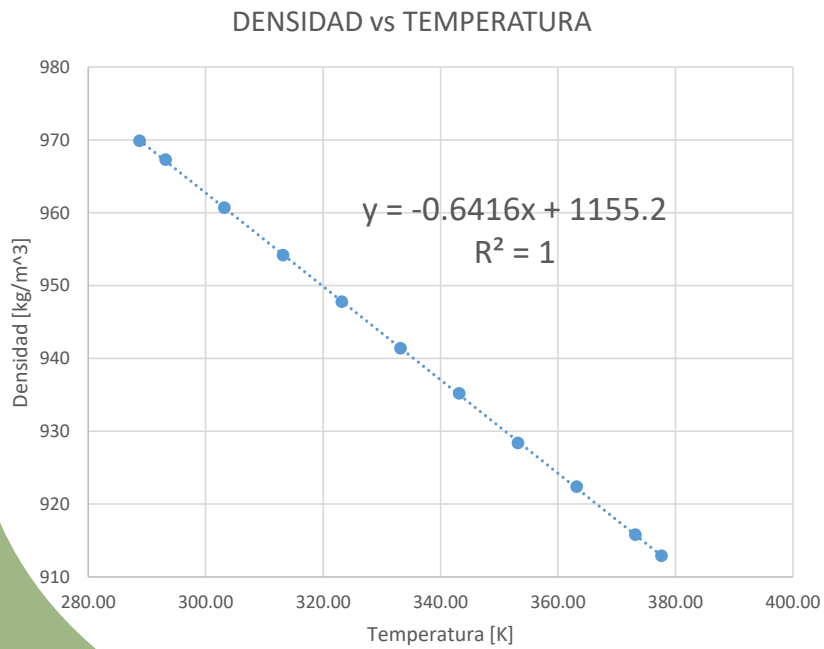
Caso B3



PROPIEDADES DEL CRUDO

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

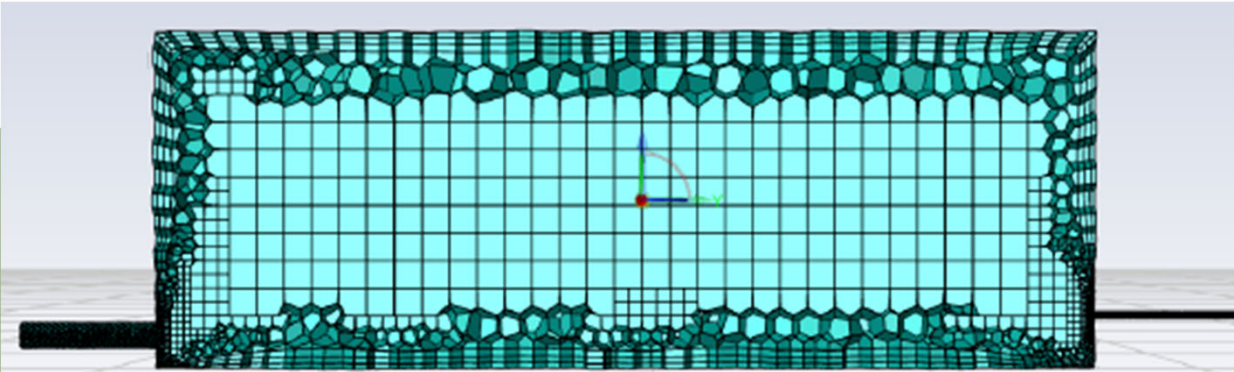
$$k = 1.2 \left[\frac{W}{m K} \right]$$



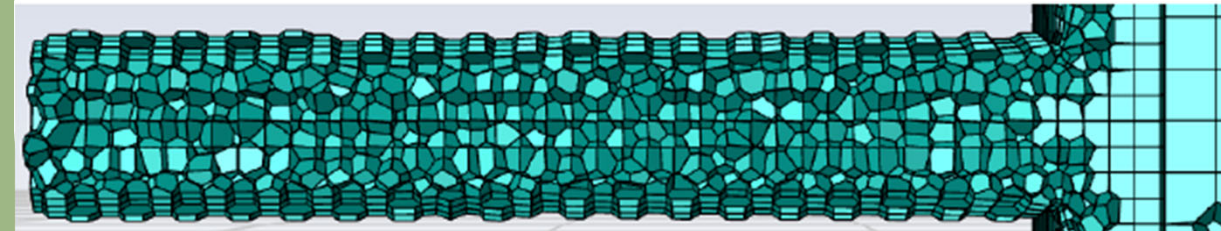


MALLADO

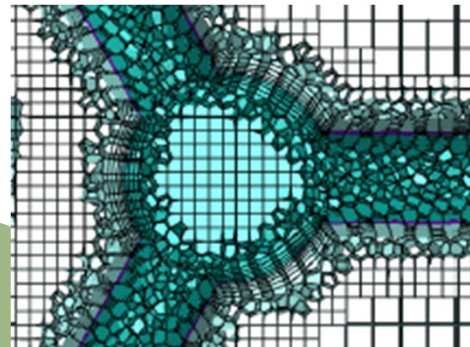
CORTE LATERAL TOTAL



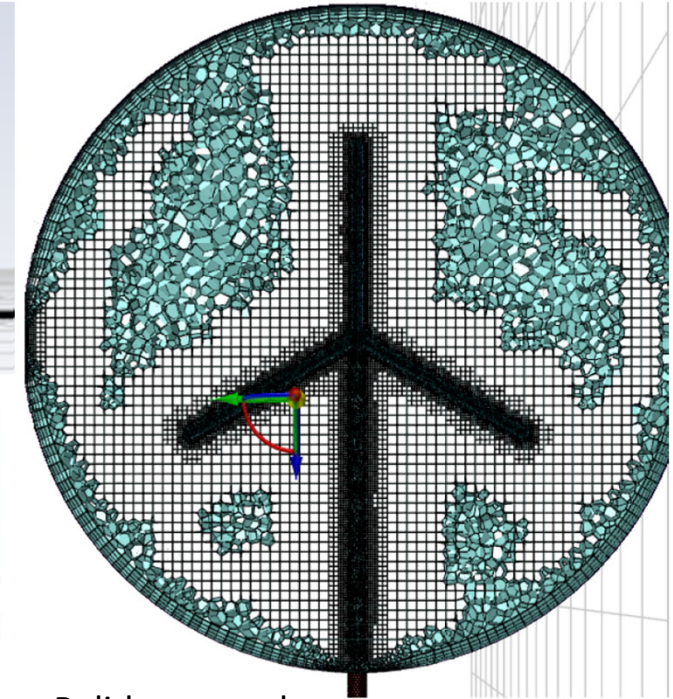
CORTE LATERAL DE LA TUBERÍA



MALLA EN LA TUBERÍA DEL DIFUSOR



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



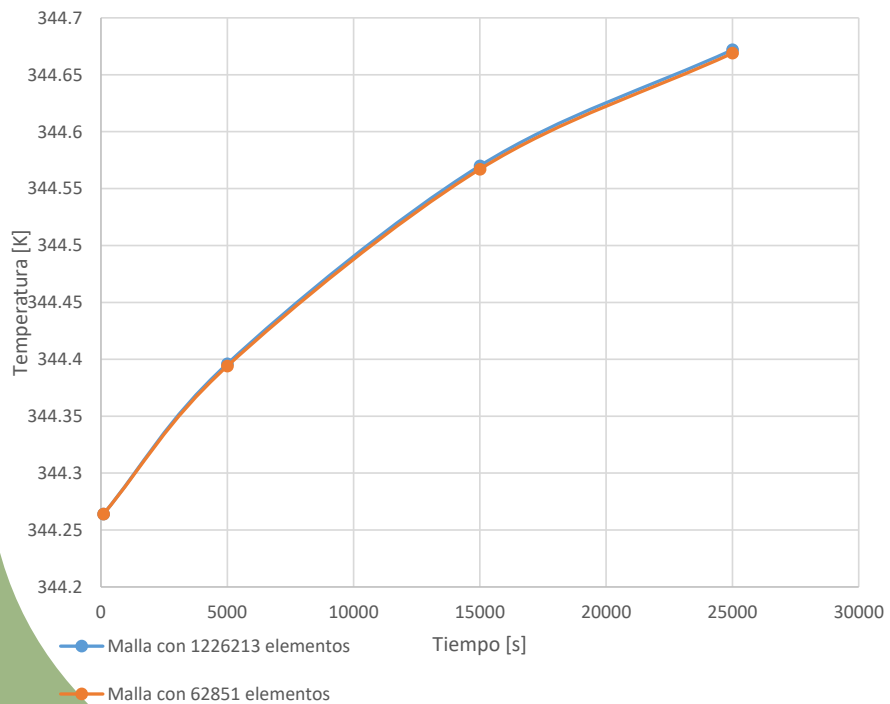
Elementos utilizados: Poli-hexagonales
Número de elementos casos A, B1 y B2: 62851
Número de elementos caso B3: 249874
Tamaño mínimo: 1 cm
Tamaño máximo: 80 cm
Oblicuidad: 0.85

Ortogonalidad: 0.22

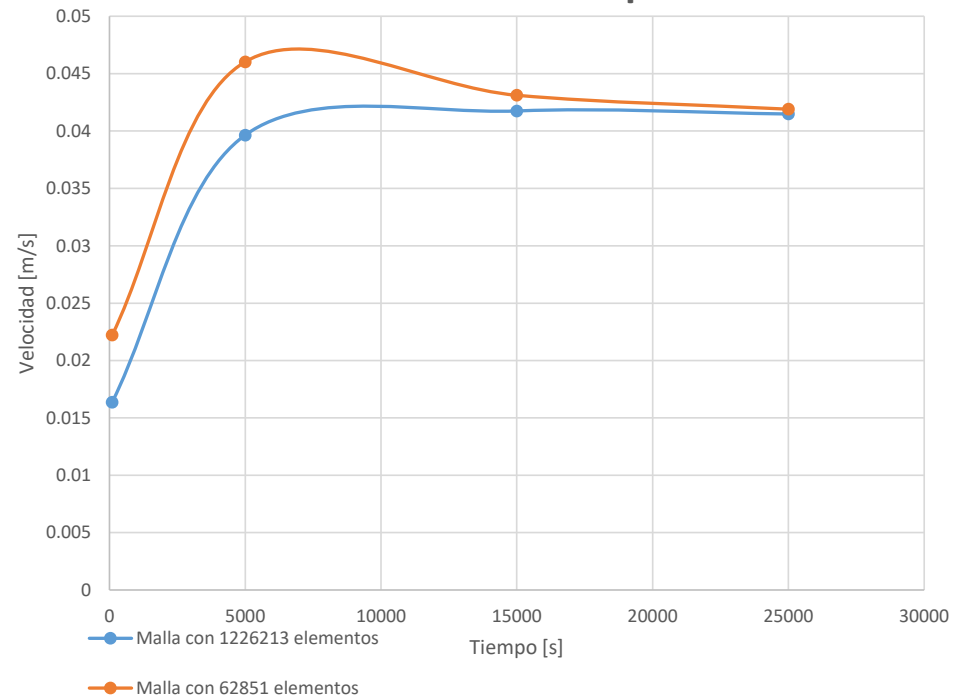


CONVERGENCIA DE MALLA

Temperatura vs Tiempo

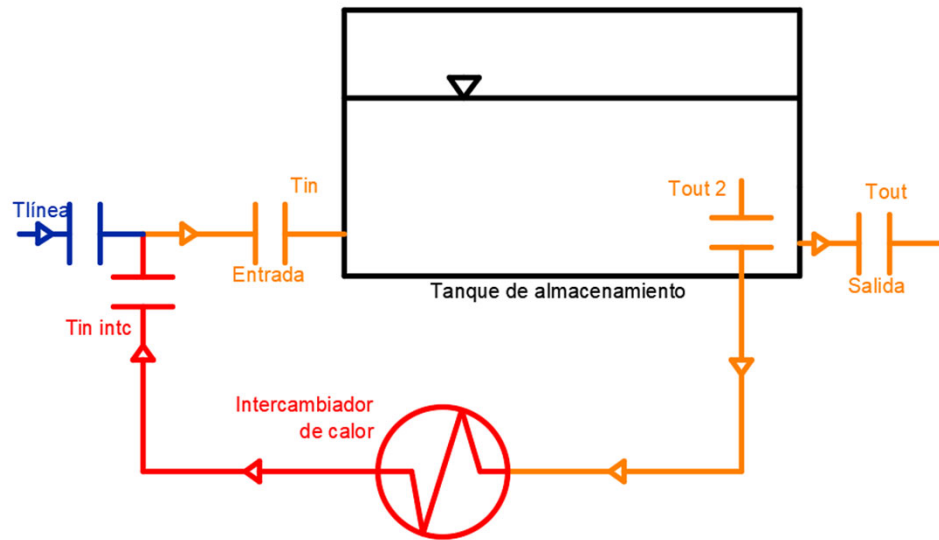


Velocidad vs Tiempo





CONDICIONES PARA SIMULACIÓN



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

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

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

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

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

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

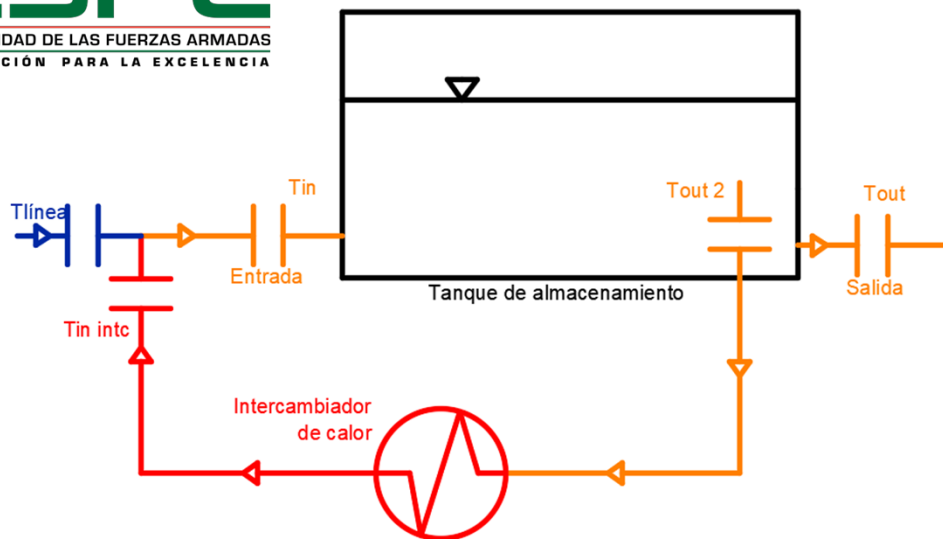
Temperatura de ingreso utilizada en los casos B1, B2 y B3

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

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 ² K]
Techo, pared	Convección ambiente	116.8 [W/m ² 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 ² 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]

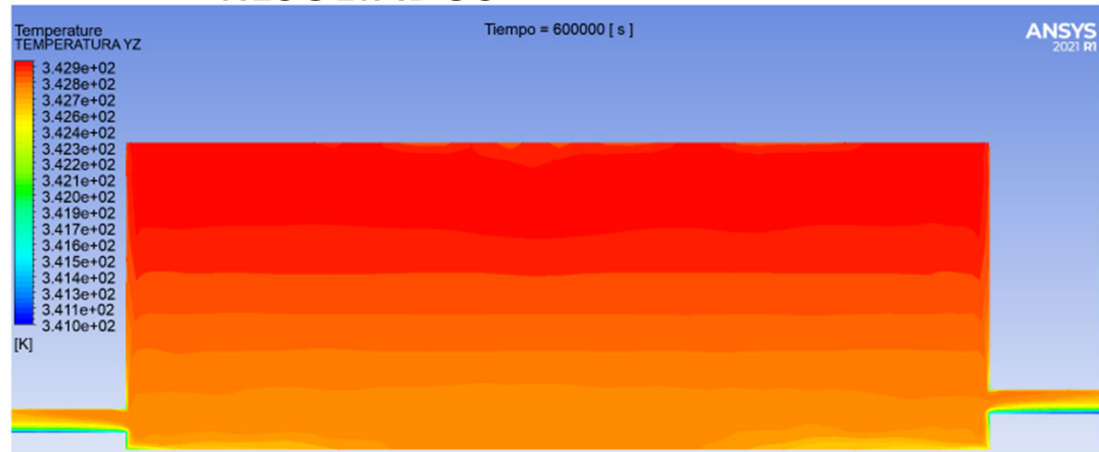
Condiciones de borde para el calentamiento, caso B opción 3

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

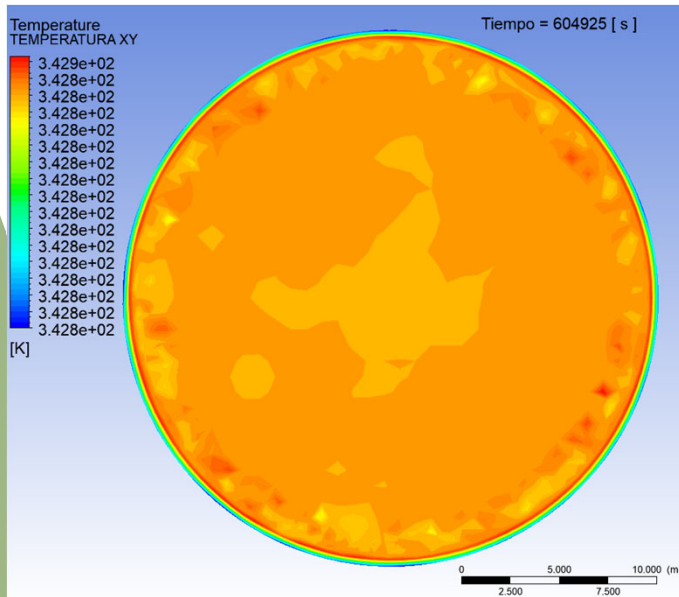
ENFRIAMIENTO

RESULTADOS

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA LUEGO DE 7 DÍAS

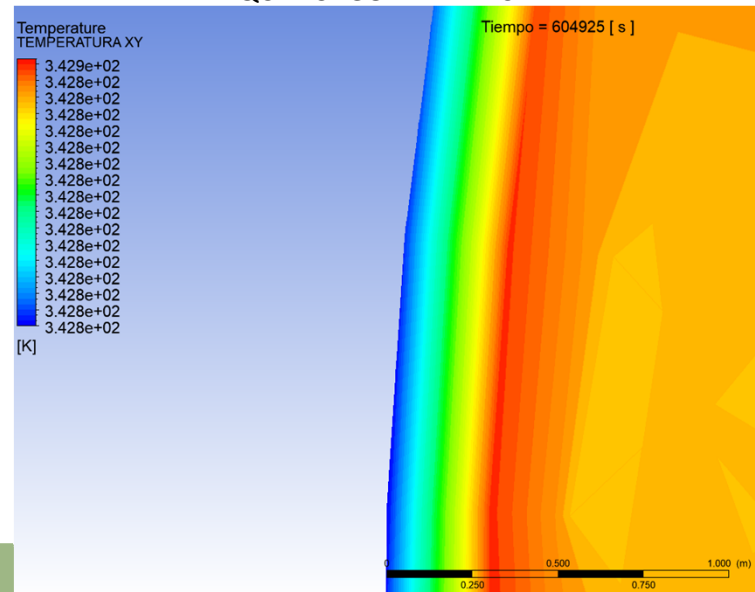


DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA LUEGO DE 7 DÍAS



Sección ubicada a 2.3 [m] de altura desde la base del tanque

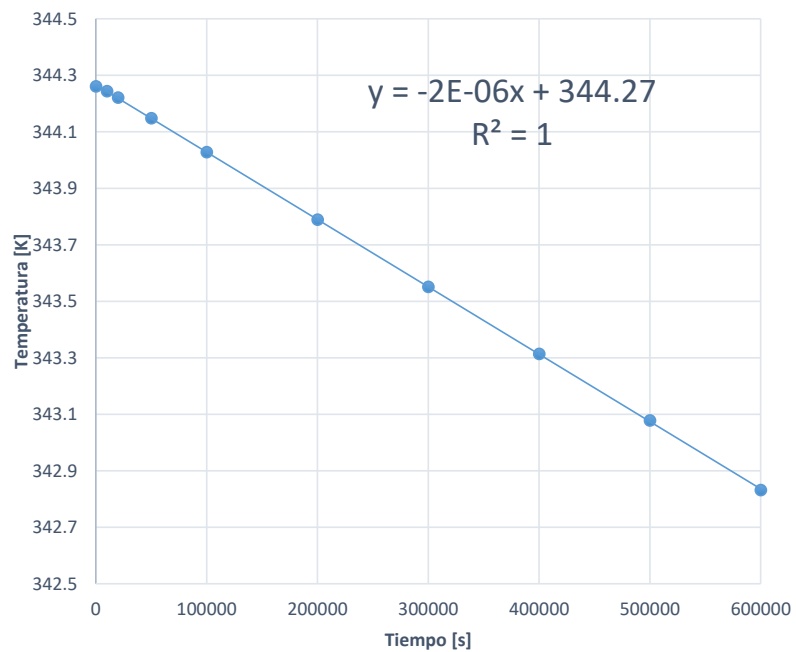
DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN EL BORDE DEL TANQUE LUEGO DE 7 DÍAS



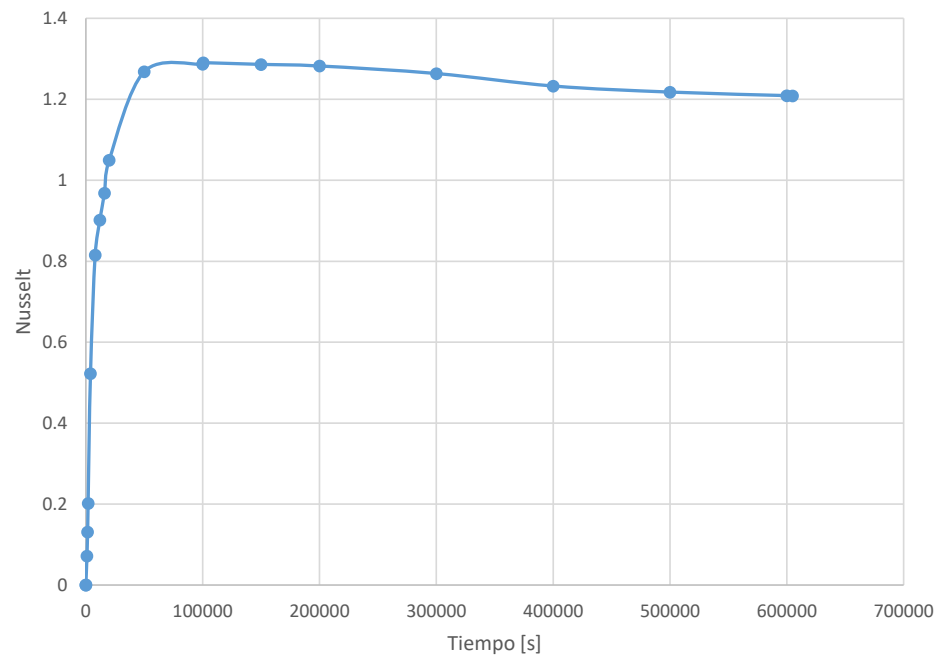
RESULTADOS

ENFRIAMIENTO

Temperatura promedio vs Tiempo



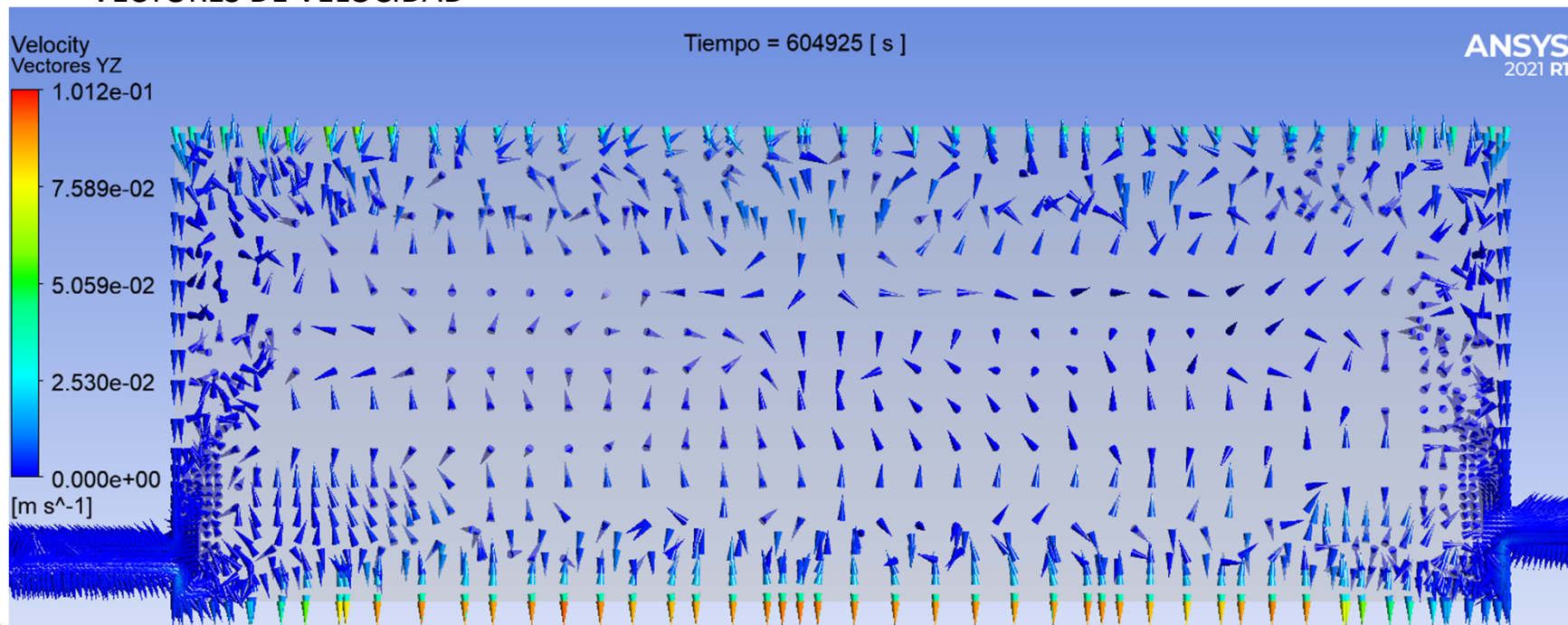
Número de Nusselt vs Tiempo



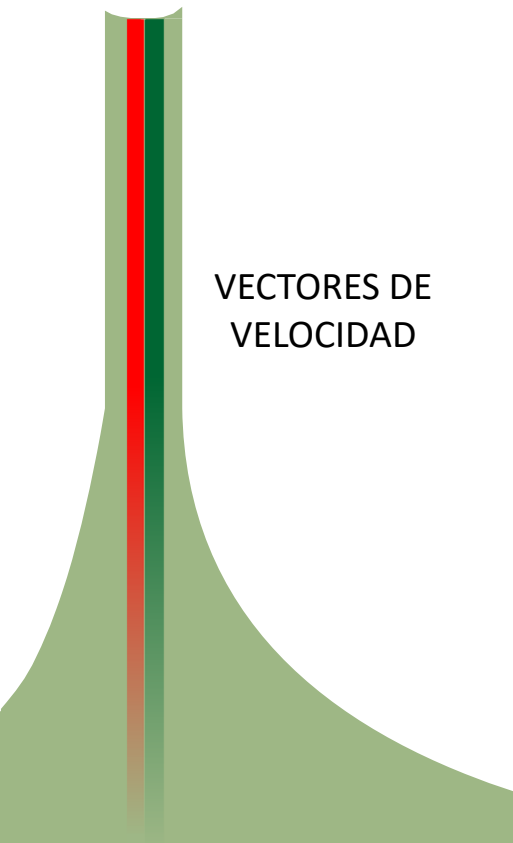
$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

ENFRIAMIENTO

VECTORES DE VELOCIDAD

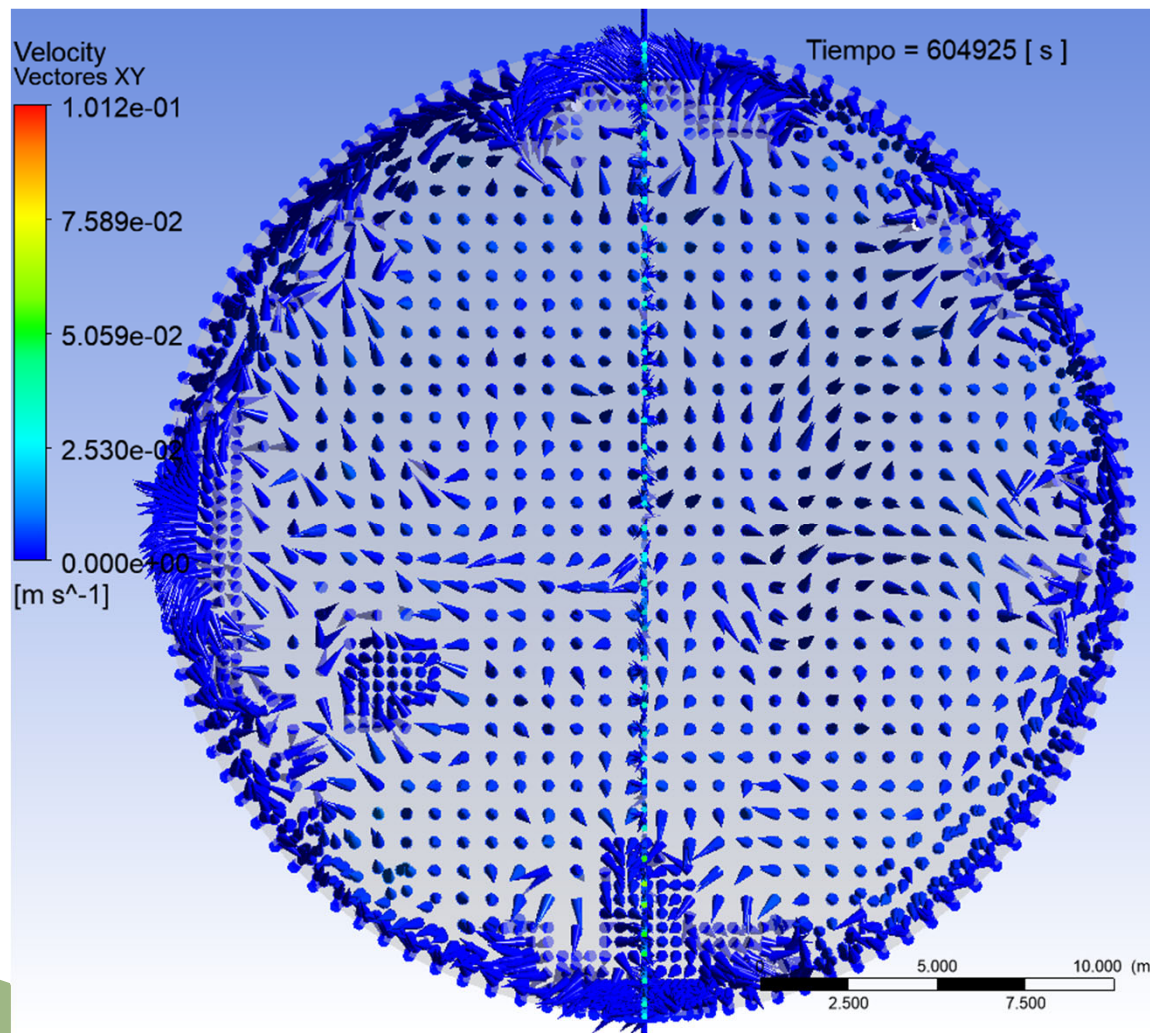


ENFRIAMIENTO



VECTORES DE VELOCIDAD

RESULTADOS



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

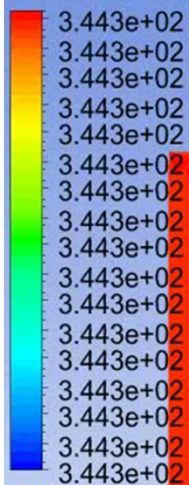
VIDEO DEL ENFRIAMIENTO DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE EN UN LAPSO DE 7 DÍAS

ENFRIAMIENTO

Temperature
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 50 [s]

ANSYS
2021 R1



[K]





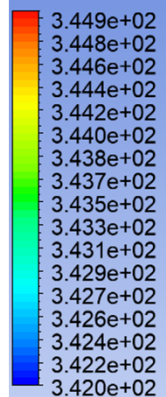
RESULTADOS

CALENTAMIENTO CASO A

DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
INICIAL

Temperature
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 50 [s]



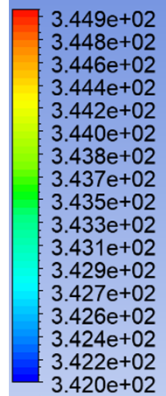
[K]



DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL

Temperature
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 86400 [s]

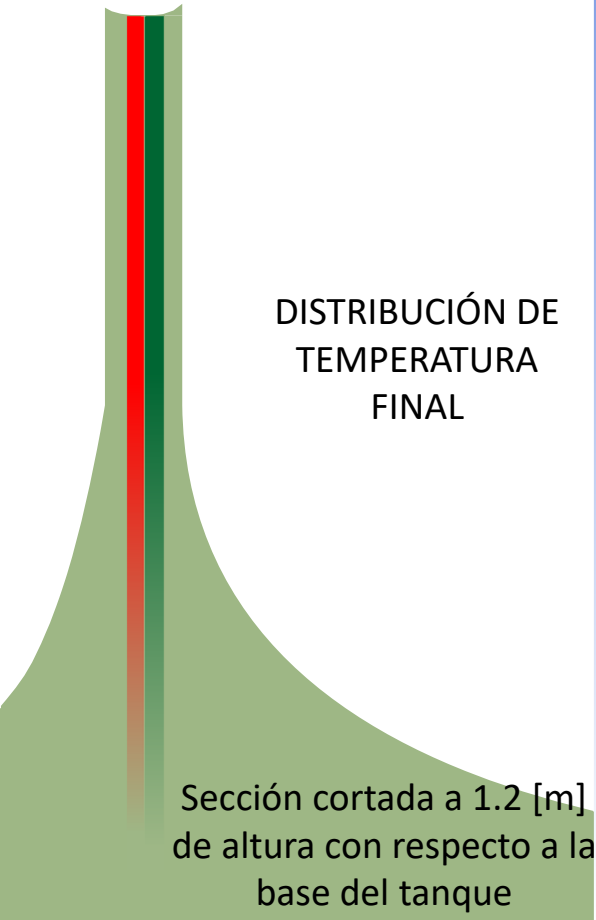


[K]

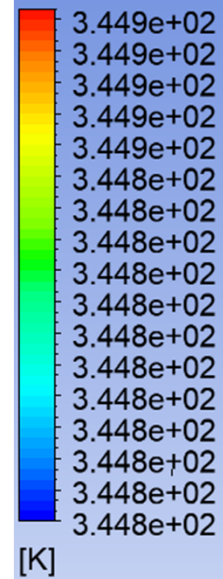


RESULTADOS

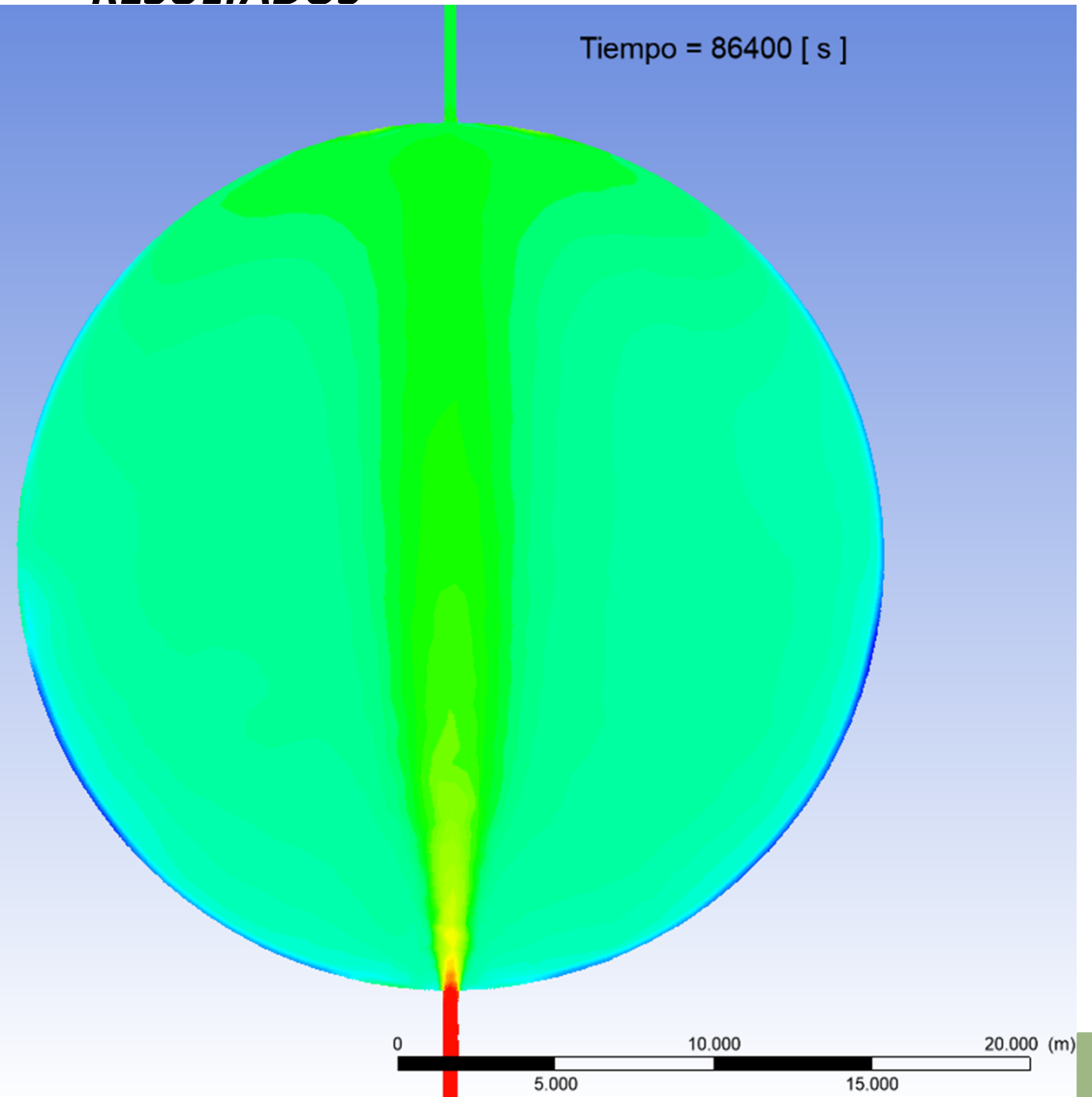
CALENTAMIENTO CASO A



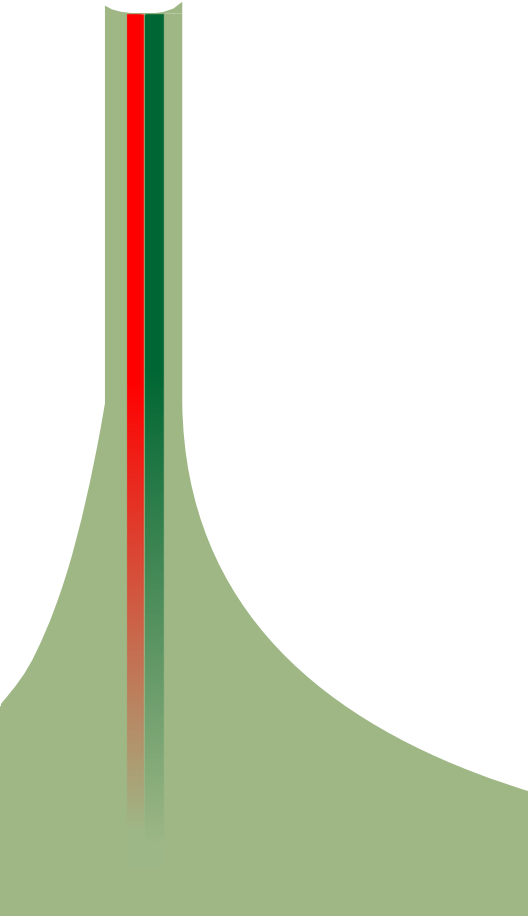
Temperature
TEMPERATURA XY



Tiempo = 86400 [s]

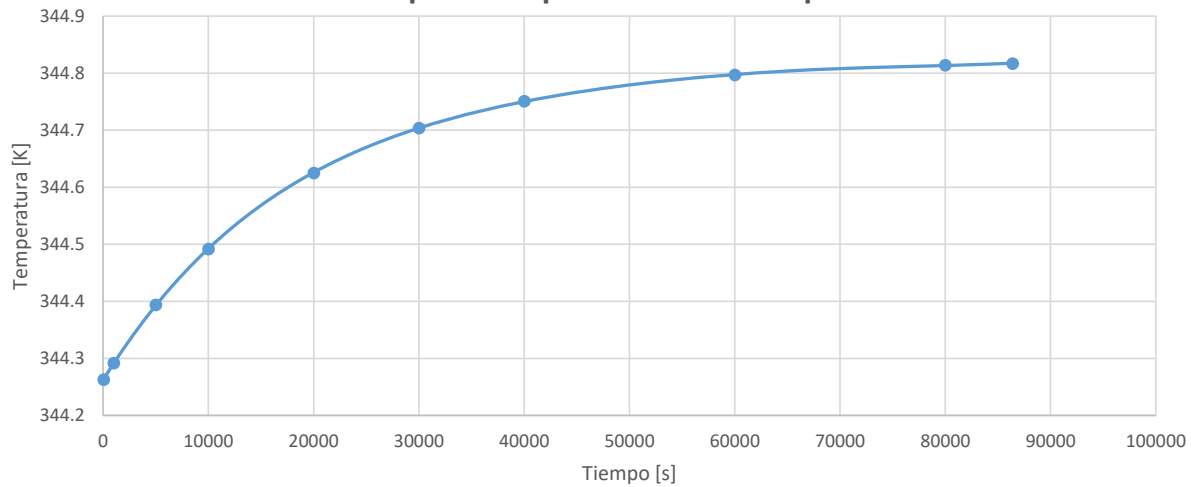


**CALENTAMIENTO
CASO A**

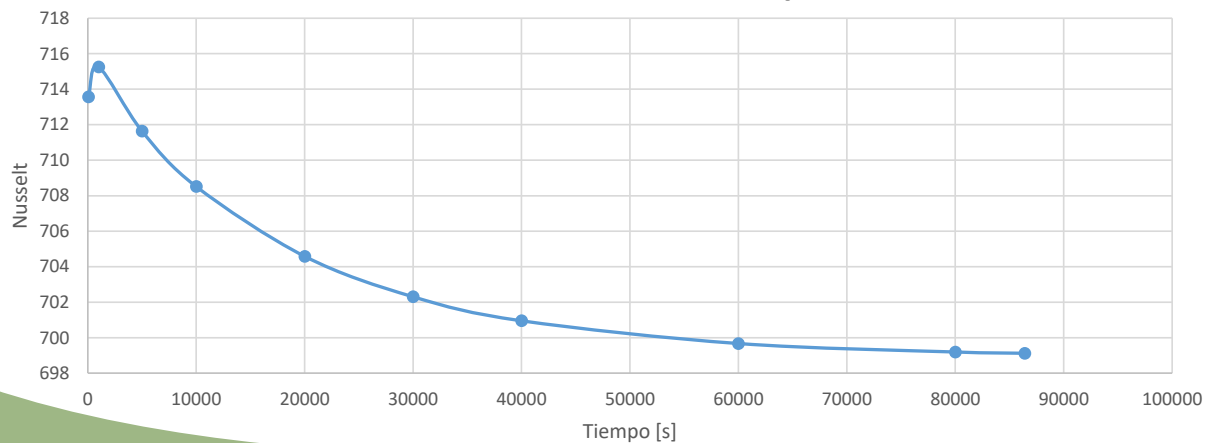


RESULTADOS

Temperatura promedio vs Tiempo



Número de Nusselt vs Tiempo



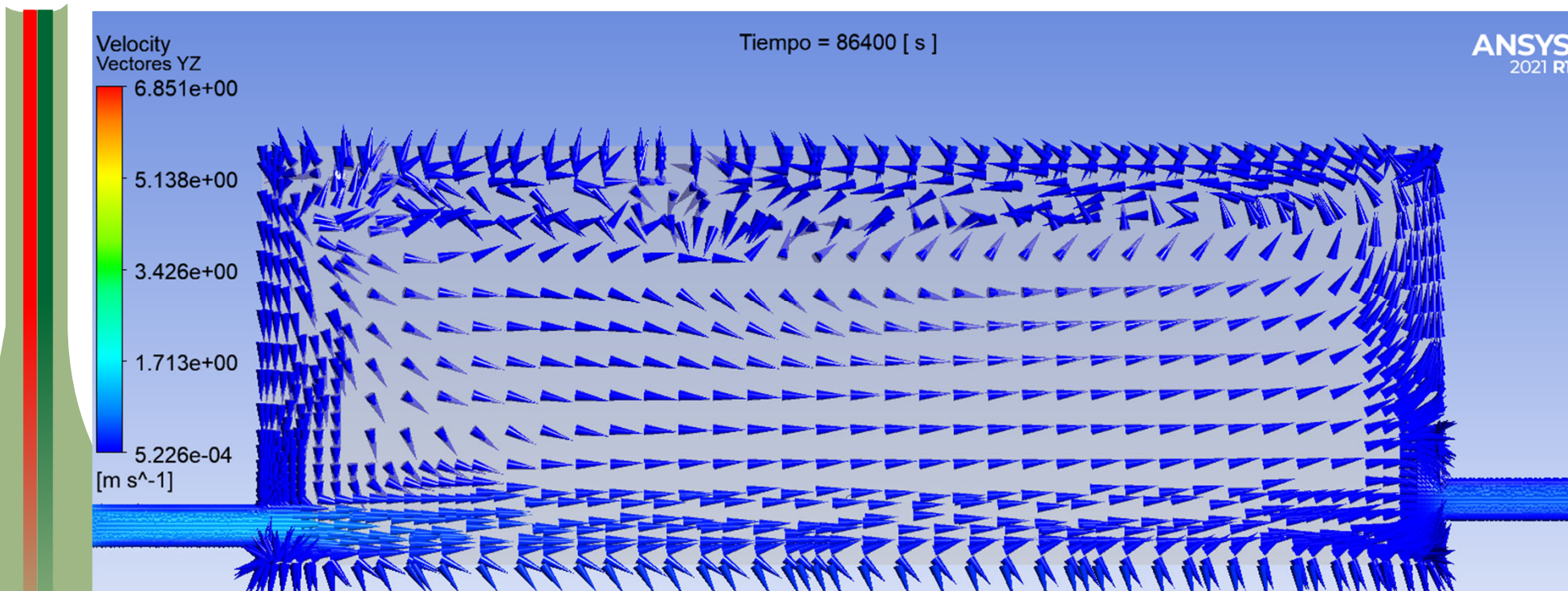
$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

RESULTADOS

CALENTAMIENTO

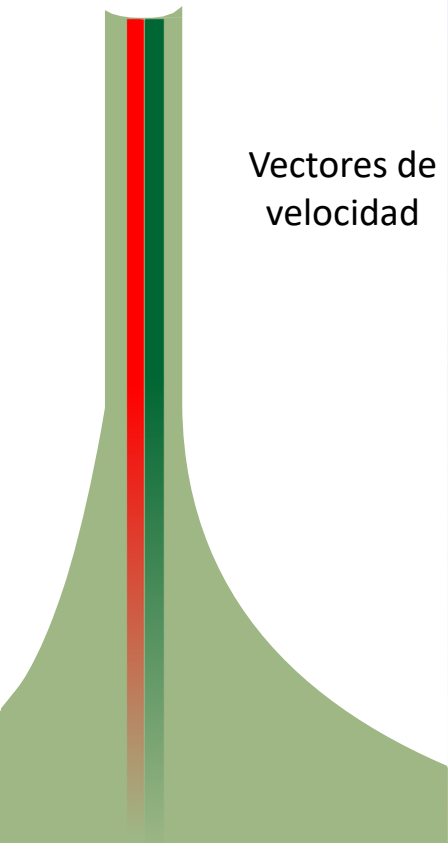
Vectores de velocidad

CASO A

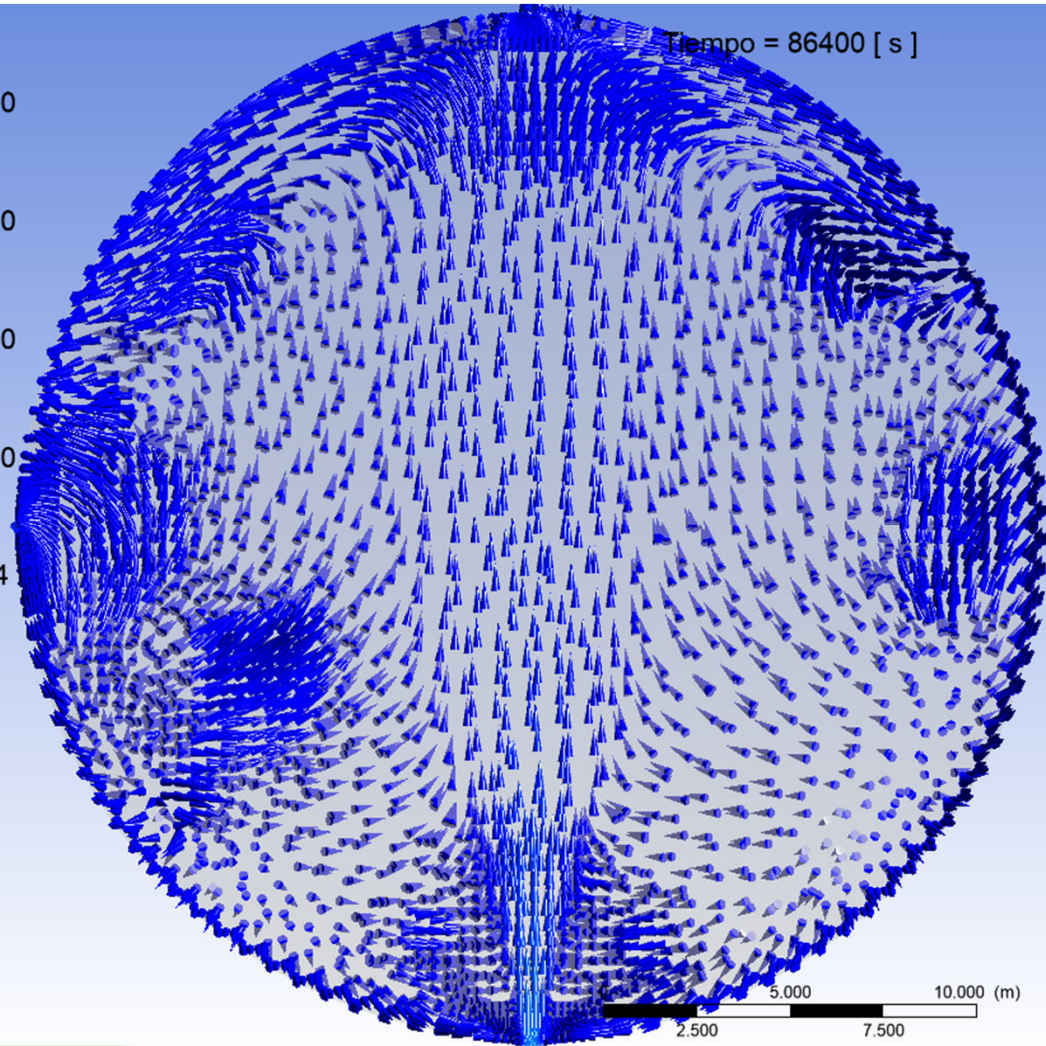
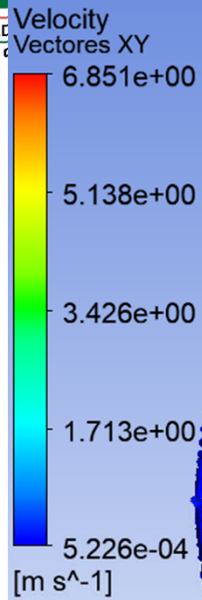


RESULTADOS

CALENTAMIENTO CASO A



Vectores de
velocidad

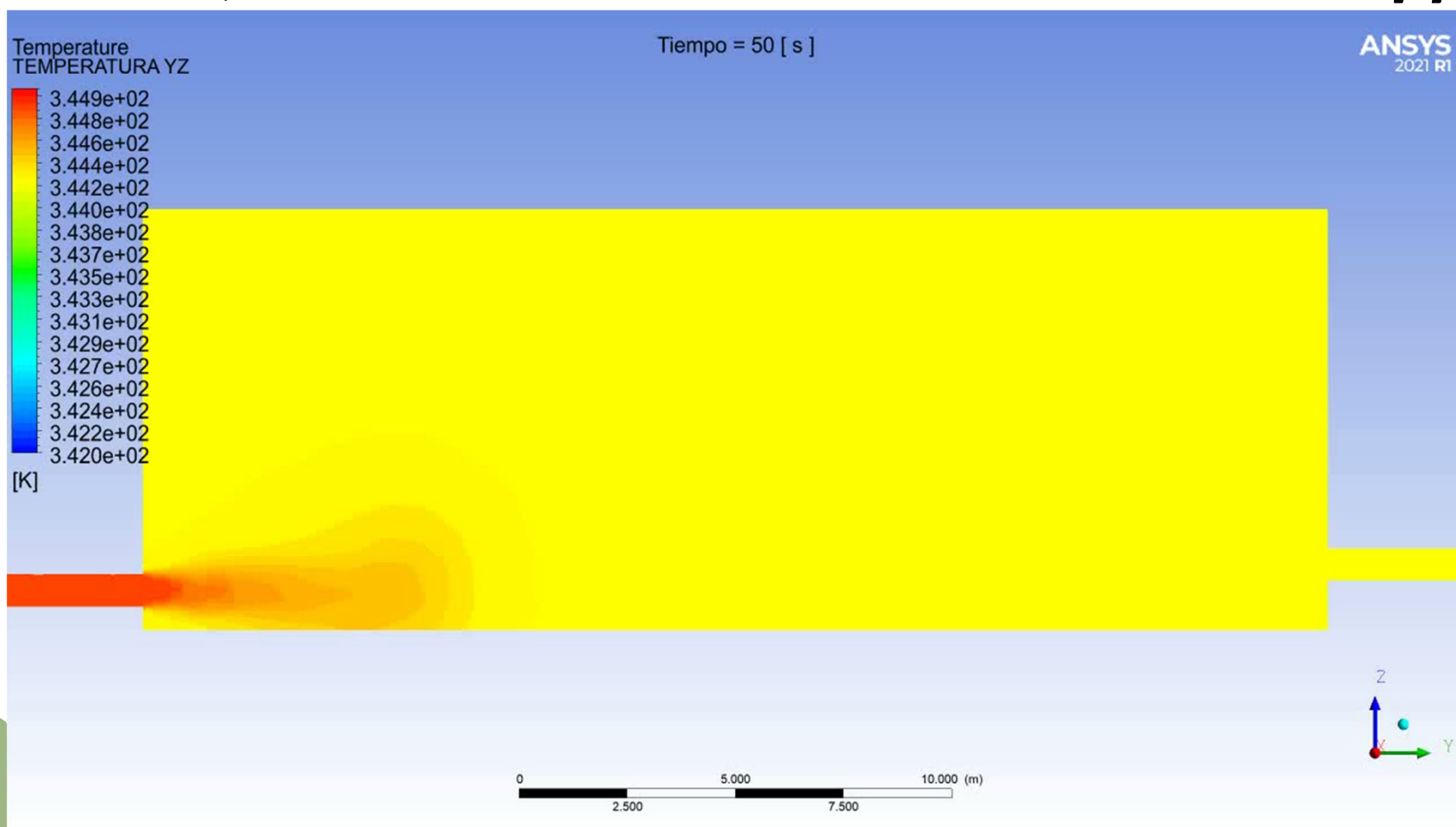


Sección cortada a 1.2 [m]
de altura con respecto a la
base del tanque



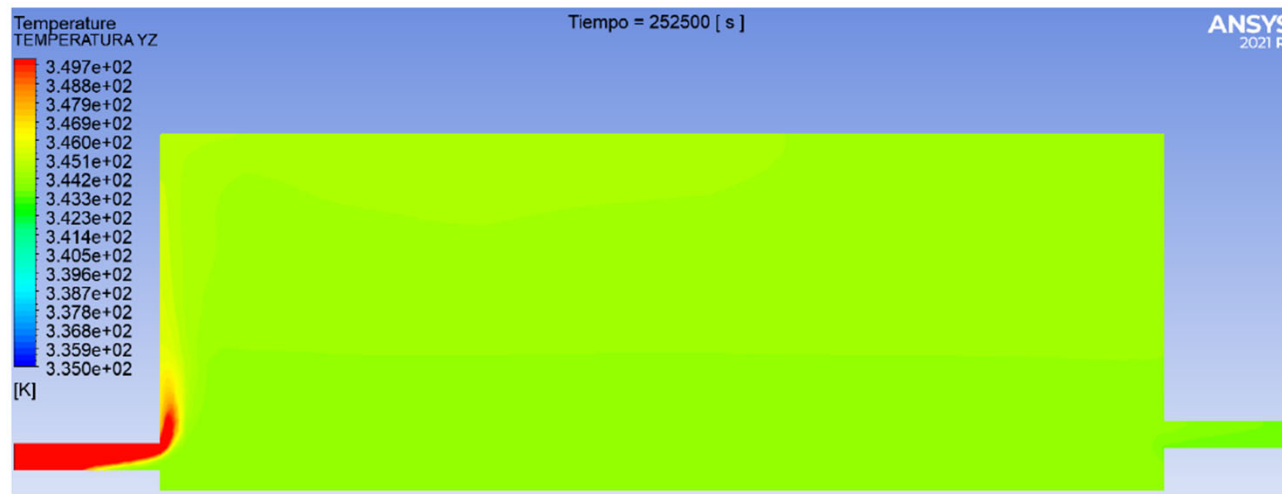
VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO A DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO CASO A





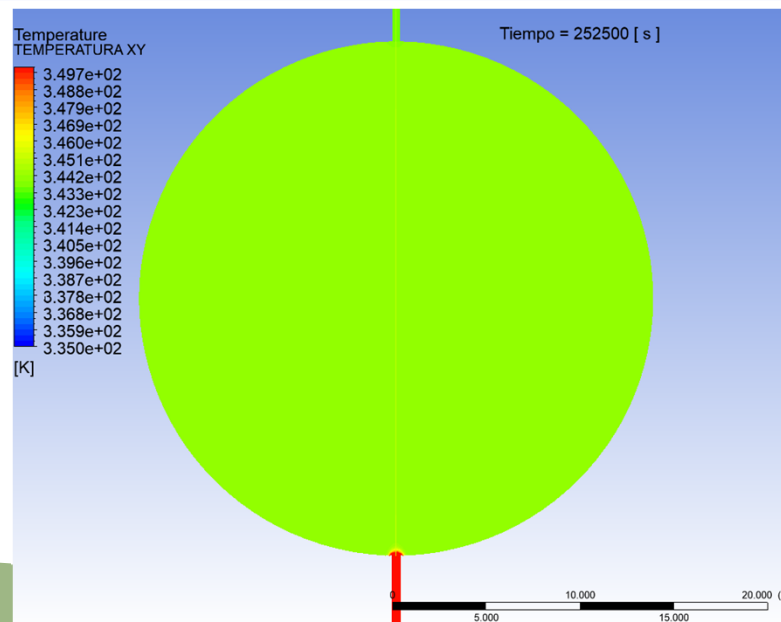
RESULTADOS



CALENTAMIENTO CASO B1

DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL

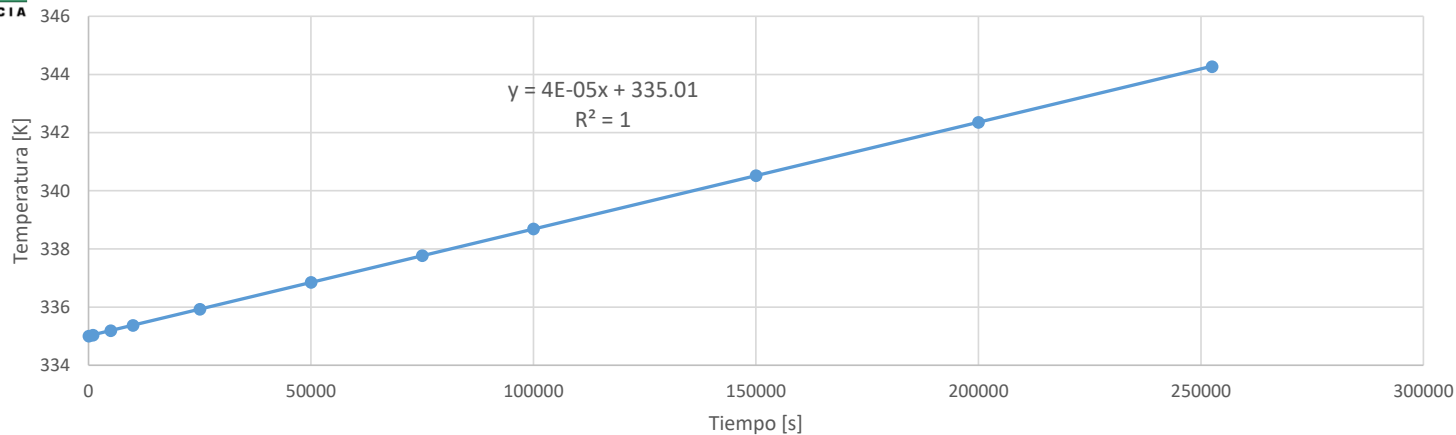
DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL



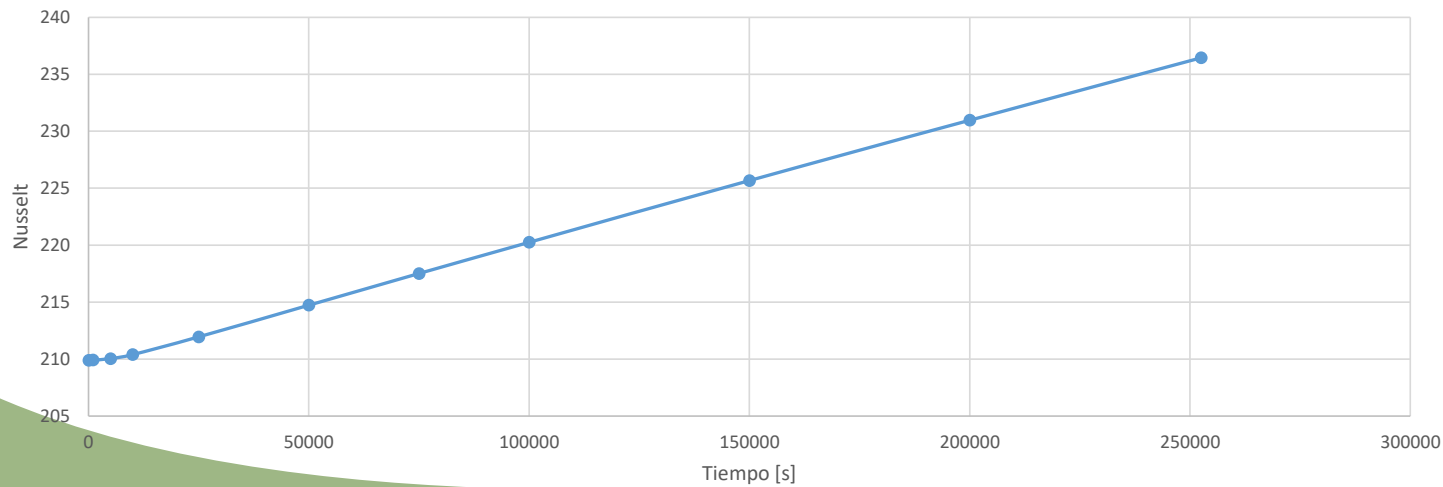
Sección cortada a 1.2
[m] de altura desde la
base del tanque

RESULTADOS

Temperatura promedio - Tiempo



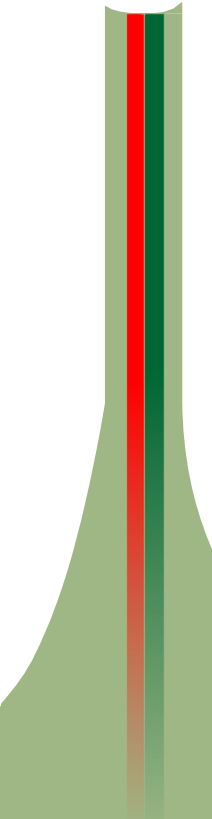
Número de Nusselt vs Tiempo



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

CALENTAMIENTO

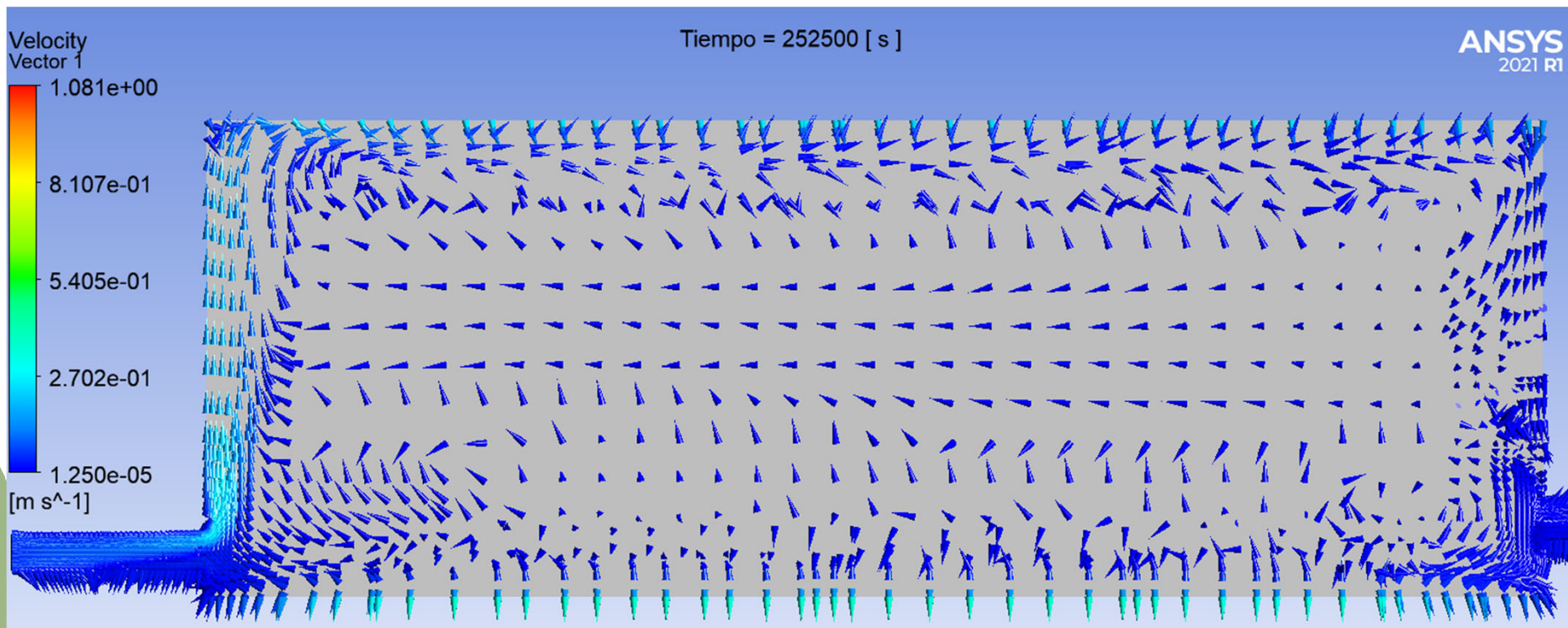
CASO B1



RESULTADOS

CALENTAMIENTO CASO B1

Vectores de velocidad





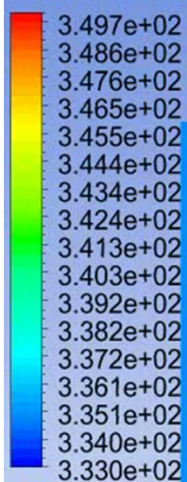
VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B1 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO
CASO B1

Temperature
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 50 [s]

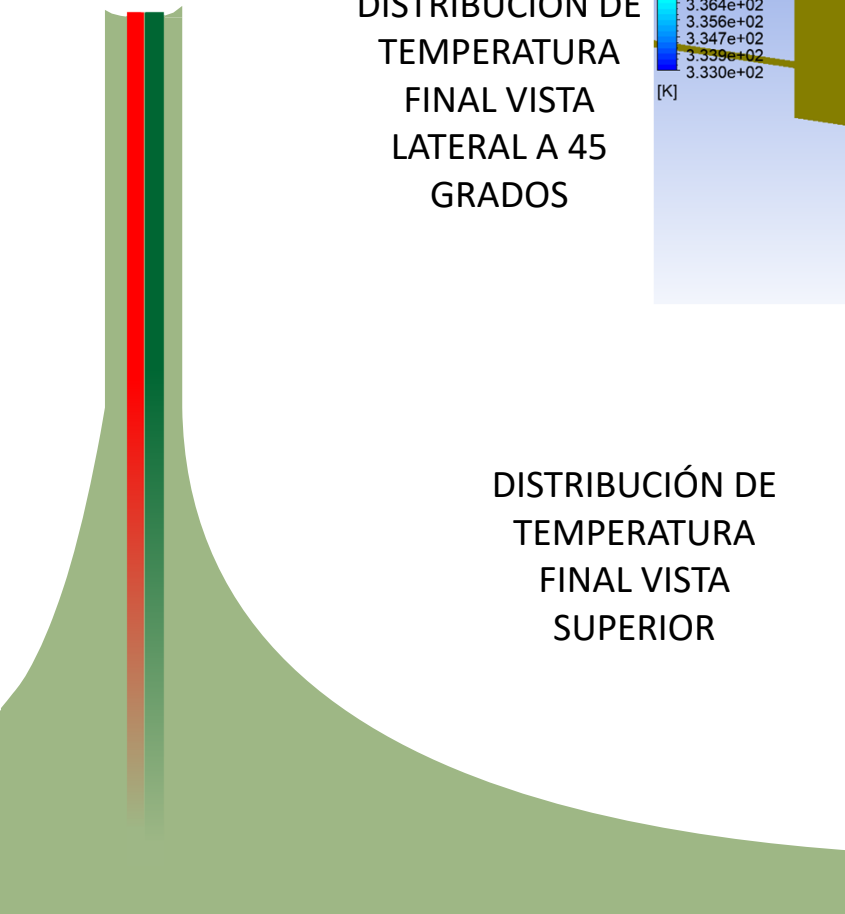
ANSYS
2021 R1



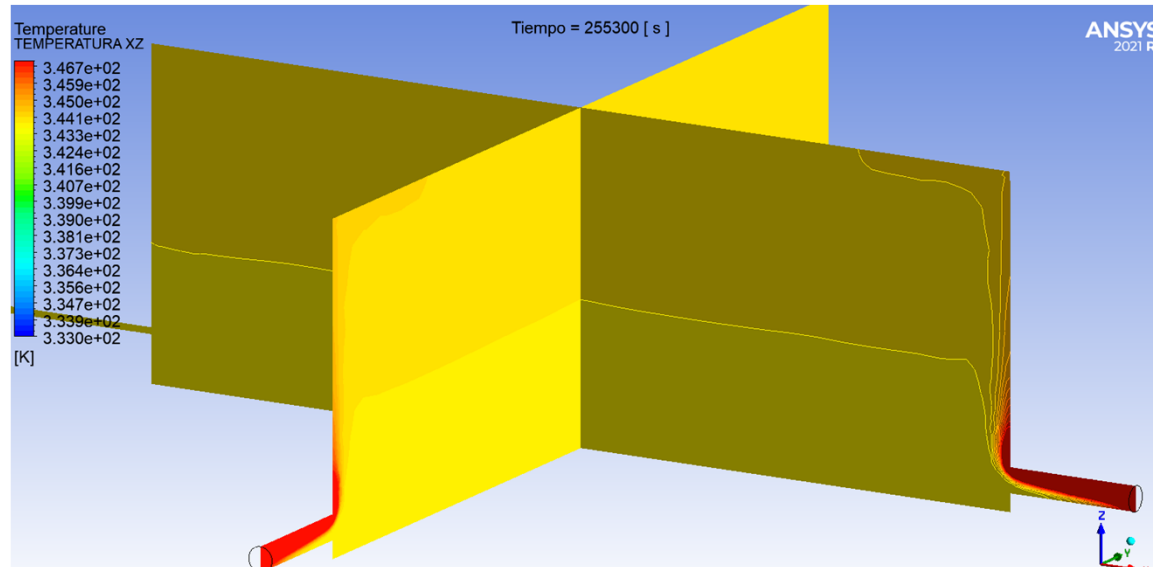
[K]



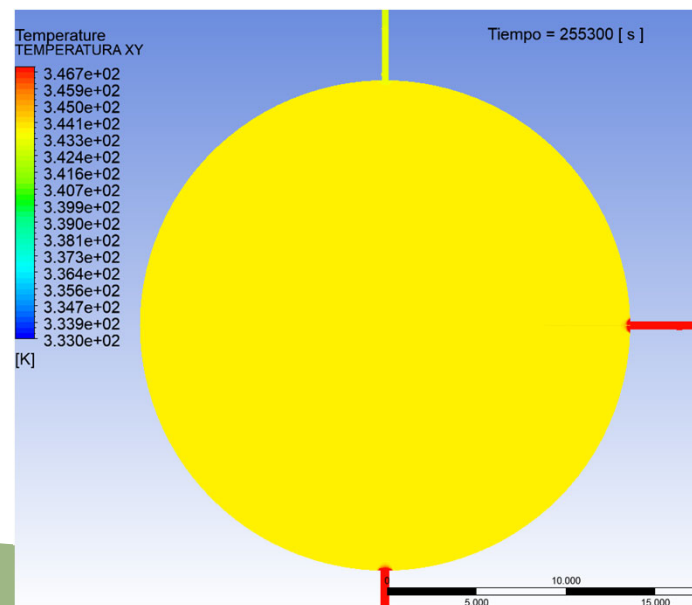
**CALENTAMIENTO
CASO B2**



DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL VISTA
LATERAL A 45
GRADOS

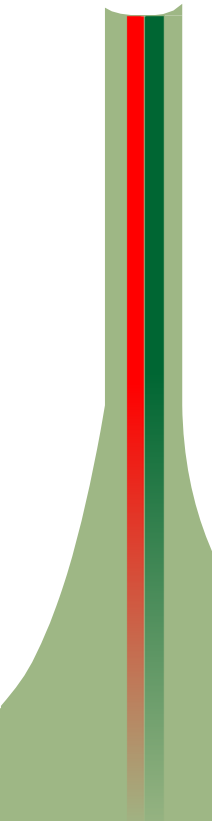


DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL VISTA
SUPERIOR



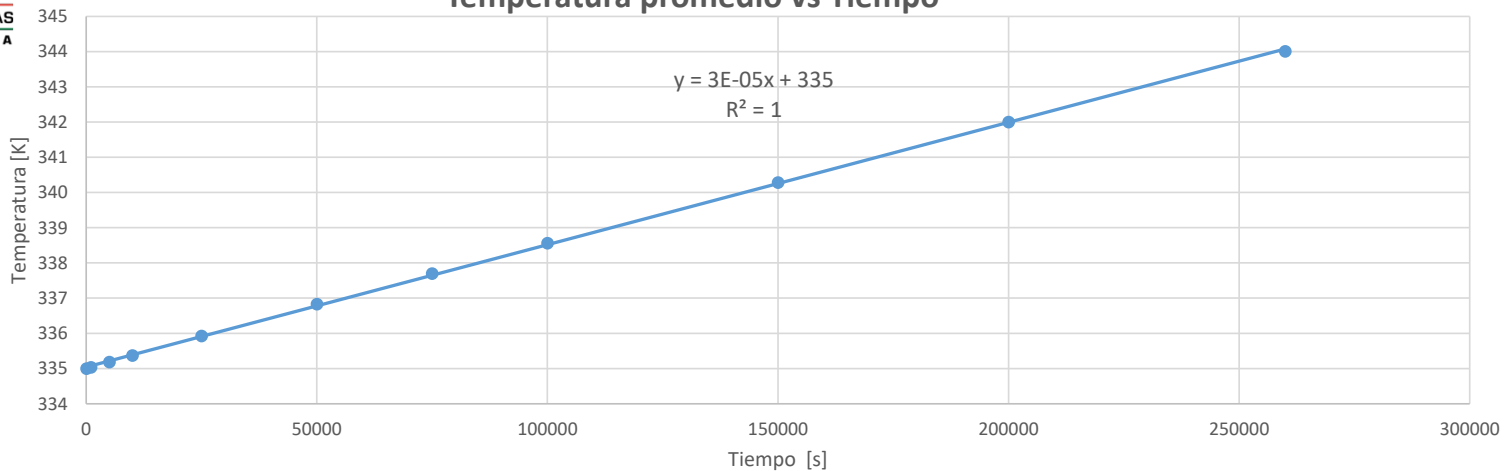
Sección cortada a 1.2
[m] de altura desde la
base del tanque

**CALENTAMIENTO
CASO B2**

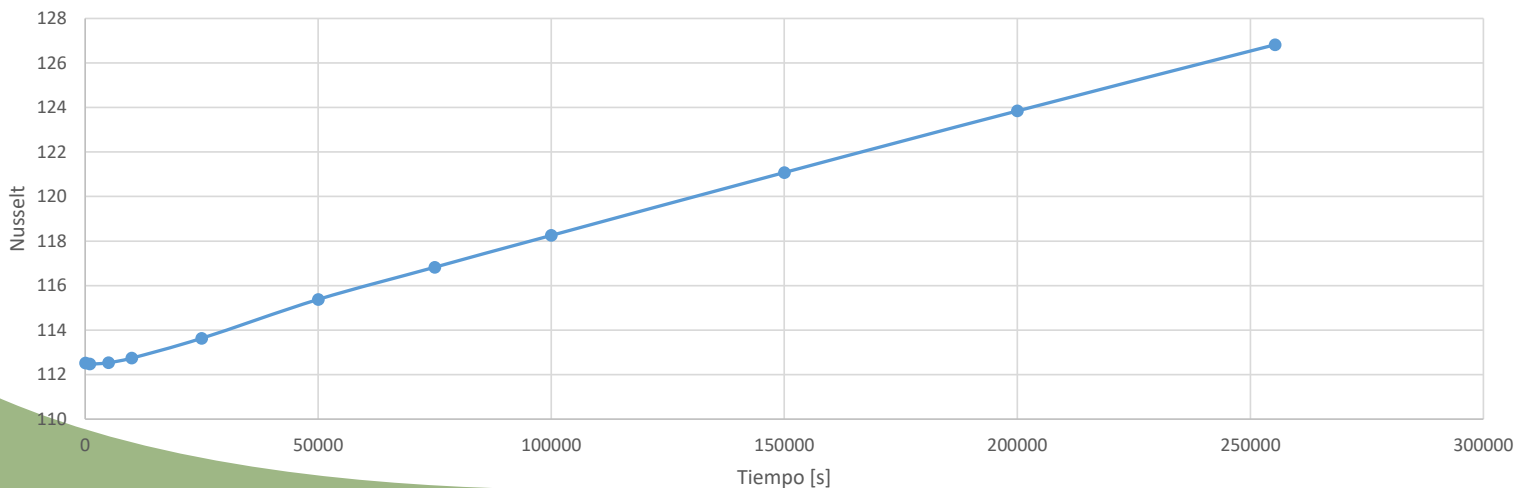


$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

RESULTADOS
Temperatura promedio vs Tiempo



Número de Nusselt vs Tiempo





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

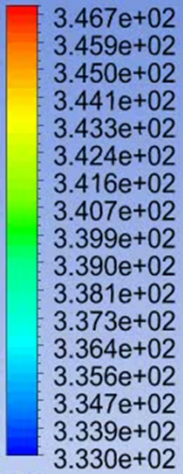
VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B2 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO
CASO B2

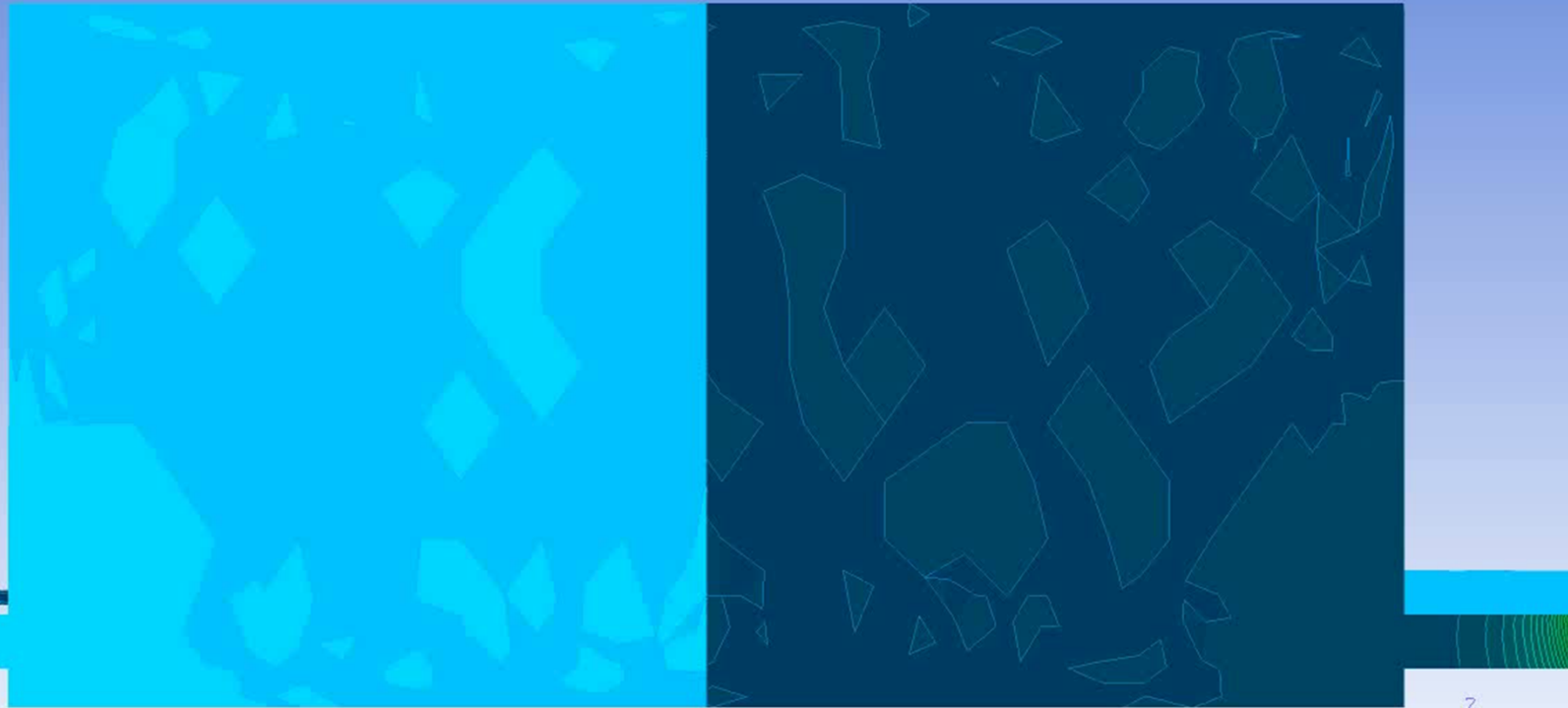
Temperature
TEMPERATURA YZ

Tiempo = 25 [s]

ANSYS
2021 R1

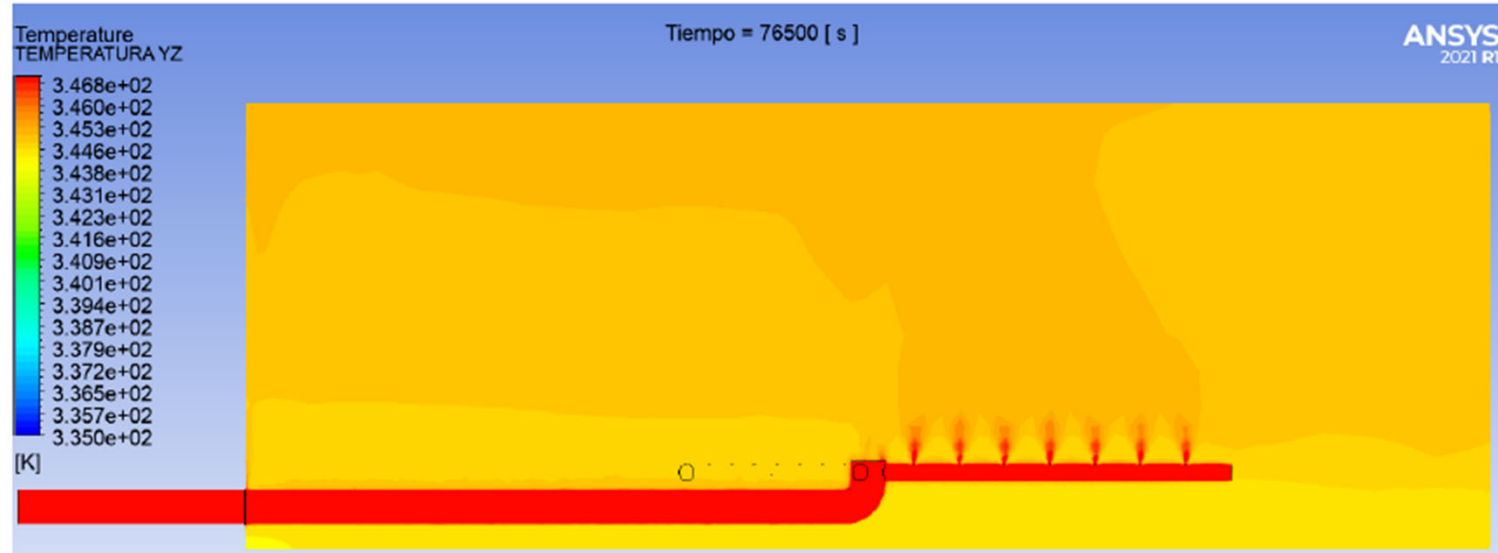


[K]

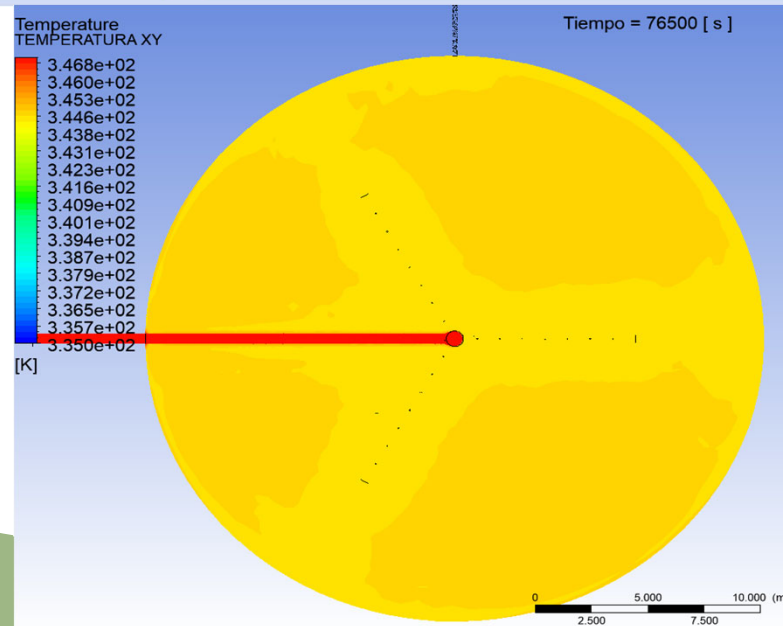


**CALENTAMIENTO
CASO B3**

DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL VISTA
LATERAL

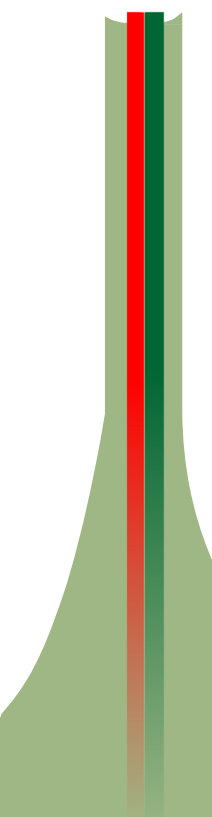


DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA
FINAL VISTA
SUPERIOR



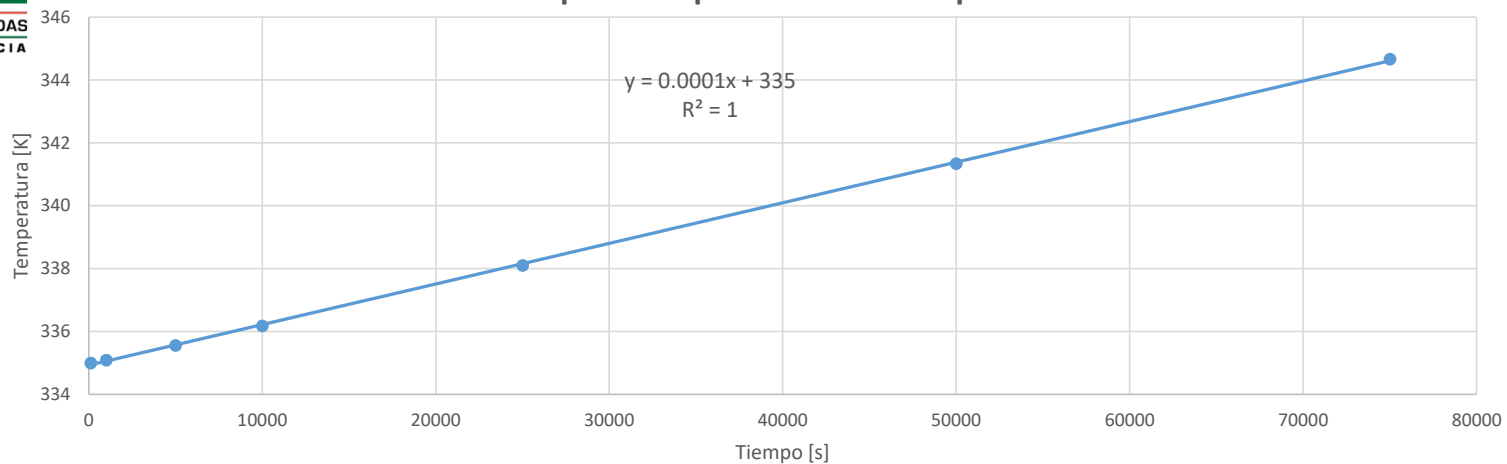
Sección cortada a 1.2 [m]
de altura con respecto a la
base del tanque

**CALENTAMIENTO
CASO B3**

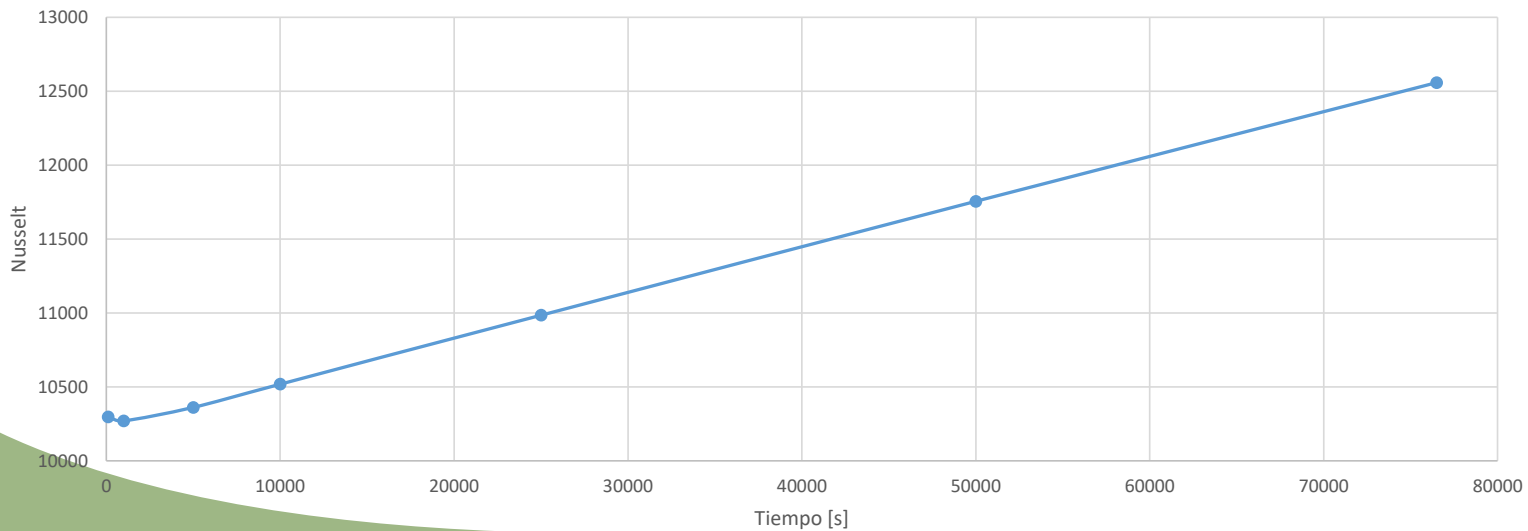


$$Nu = \frac{h}{k} * L$$

RESULTADOS
Temperatura promedio vs Tiempo

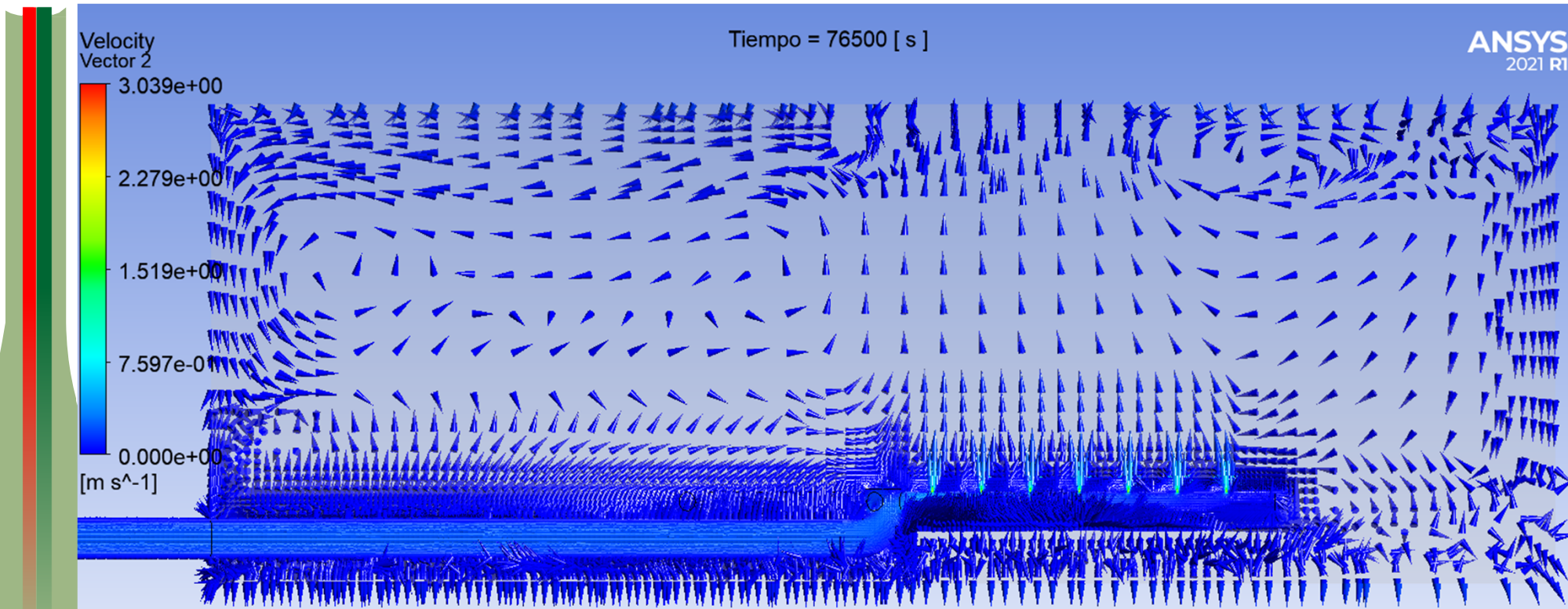


Número de Nusselt vs Tiempo



CALENTAMIENTO CASO B3

VECTORES DE VELOCIDAD

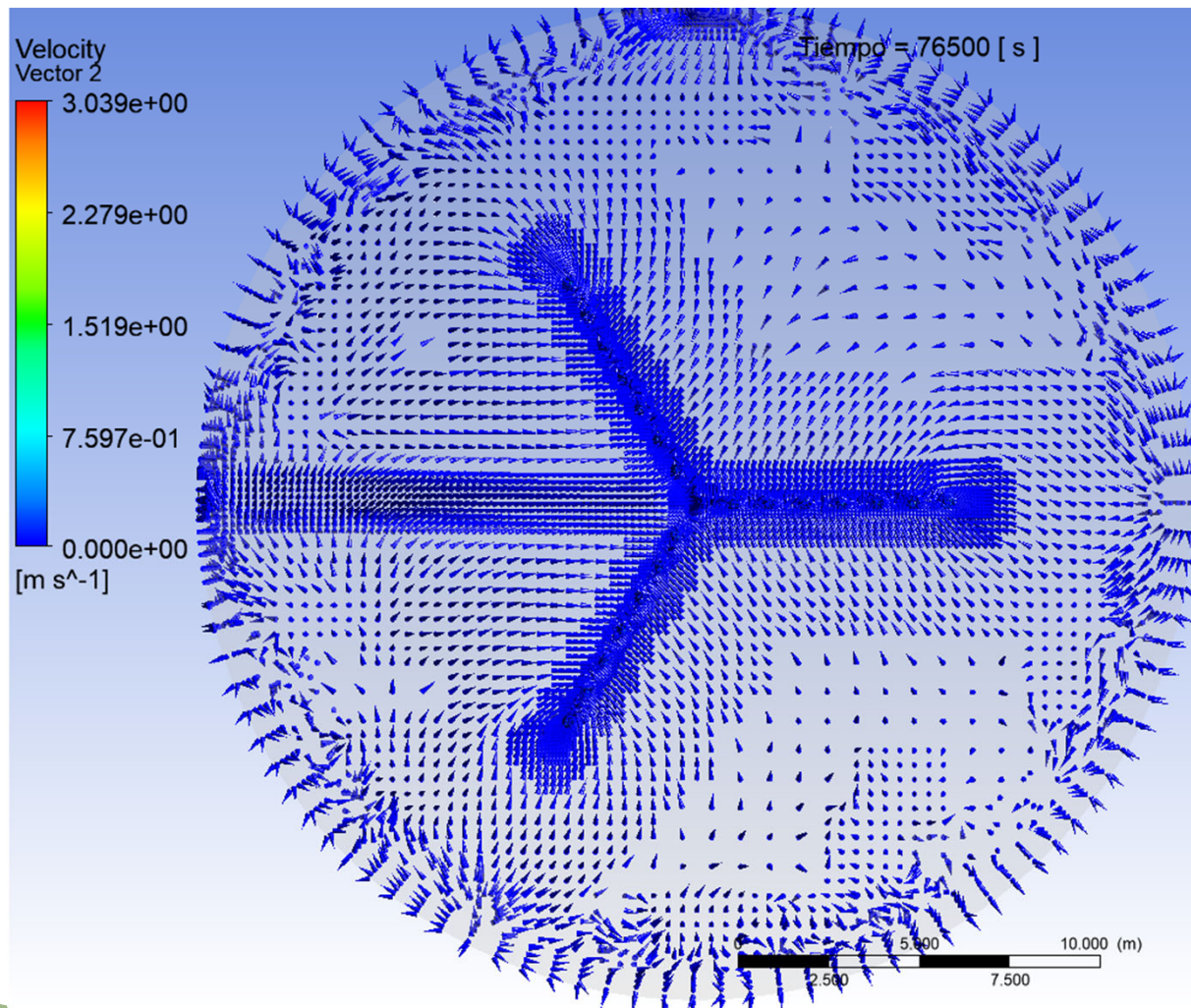


**CALENTAMIENTO
CASO B3**

VECTORES DE
VELOCIDAD

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

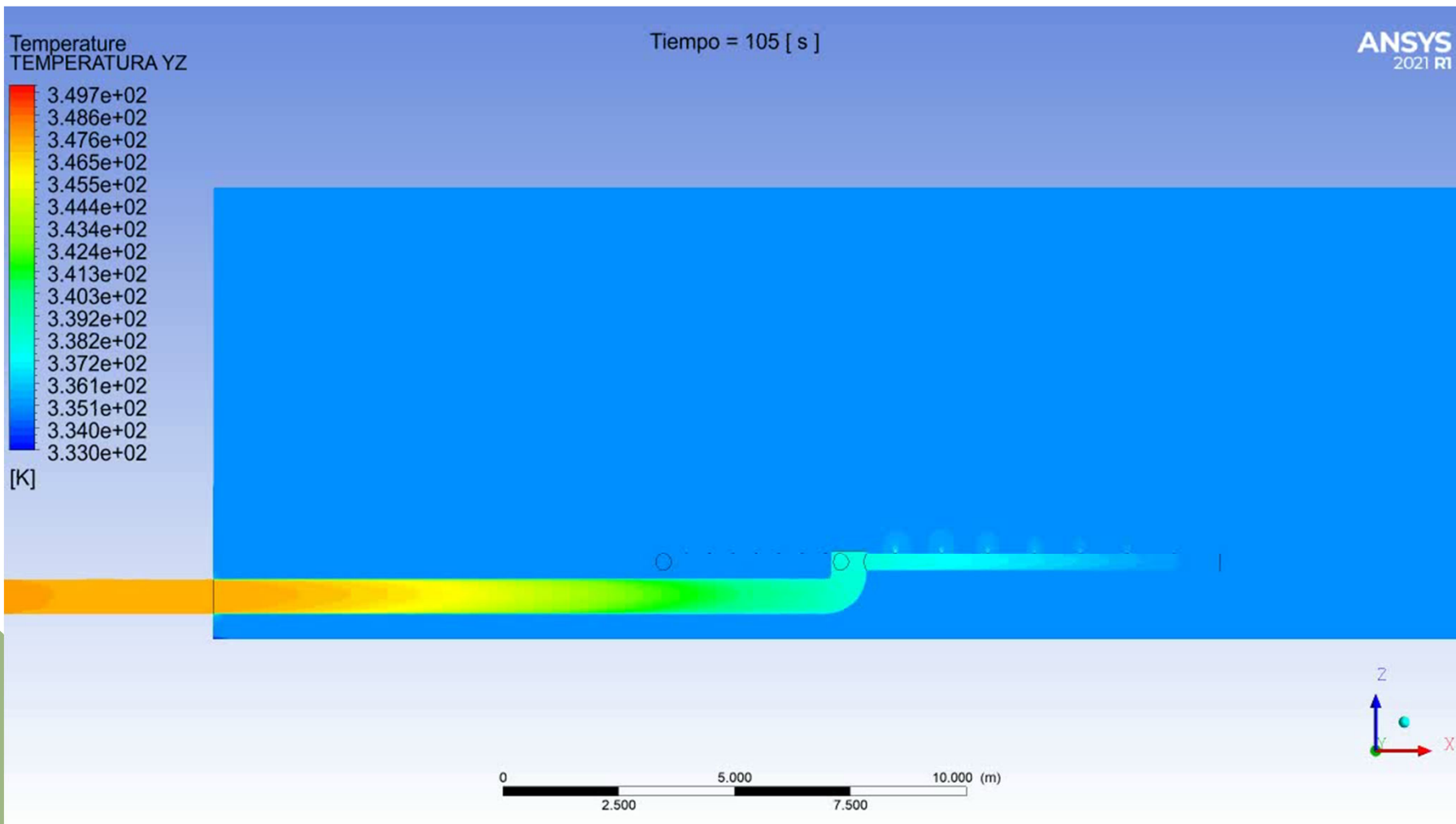
RESULTADOS





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

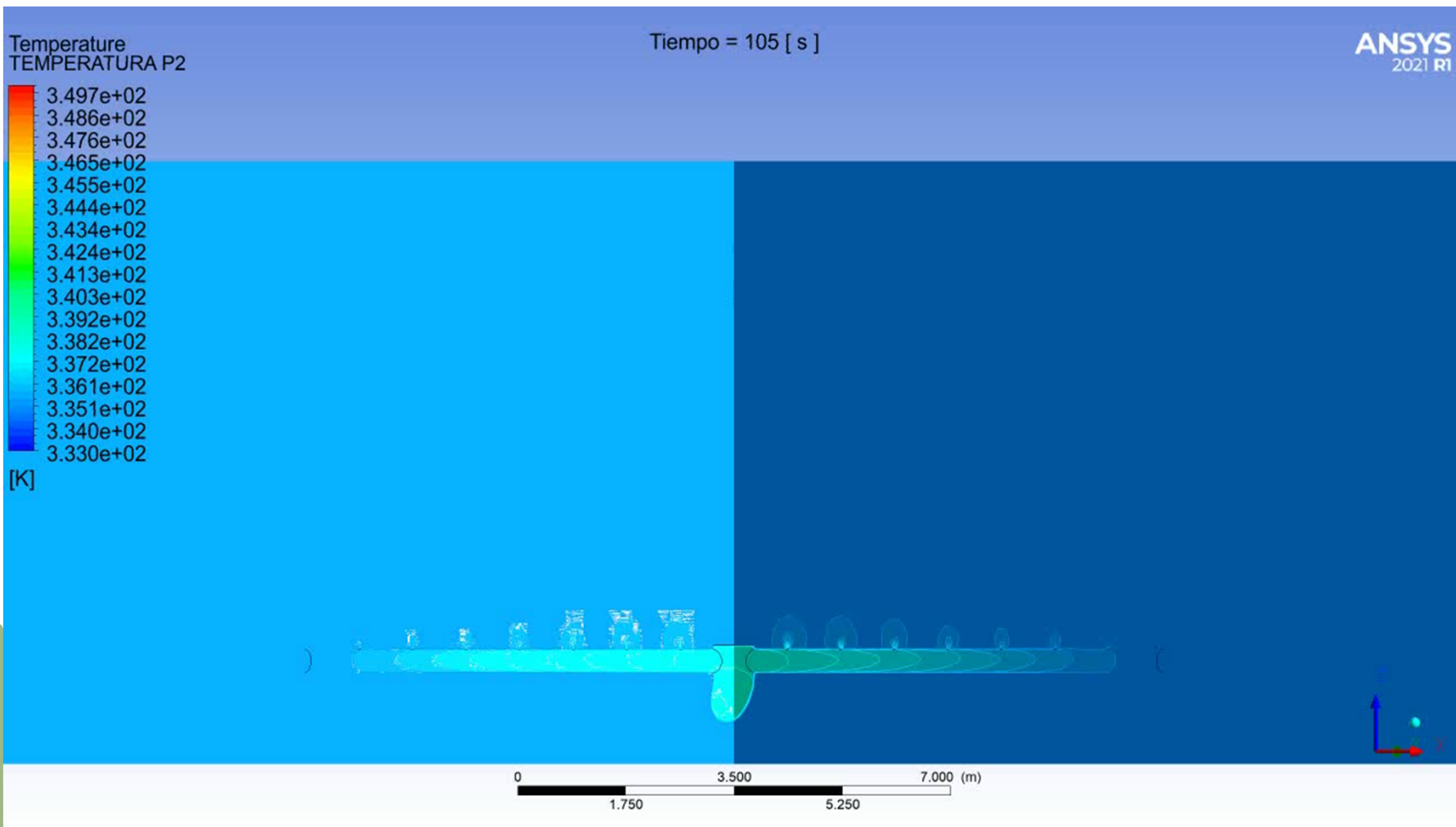
CALENTAMIENTO
CASO B3



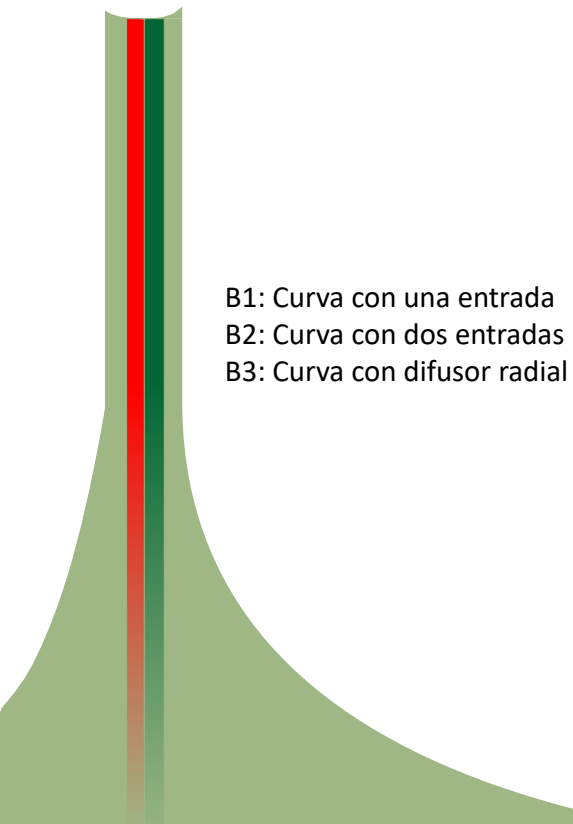


VIDEO DEL CALENTAMIENTO CASO B3 DEL CRUDO DENTRO DEL TANQUE HASTA ALCANZAR UNA TEMPERATURA PROMEDIO DE 344 [K]

CALENTAMIENTO
CASO B3

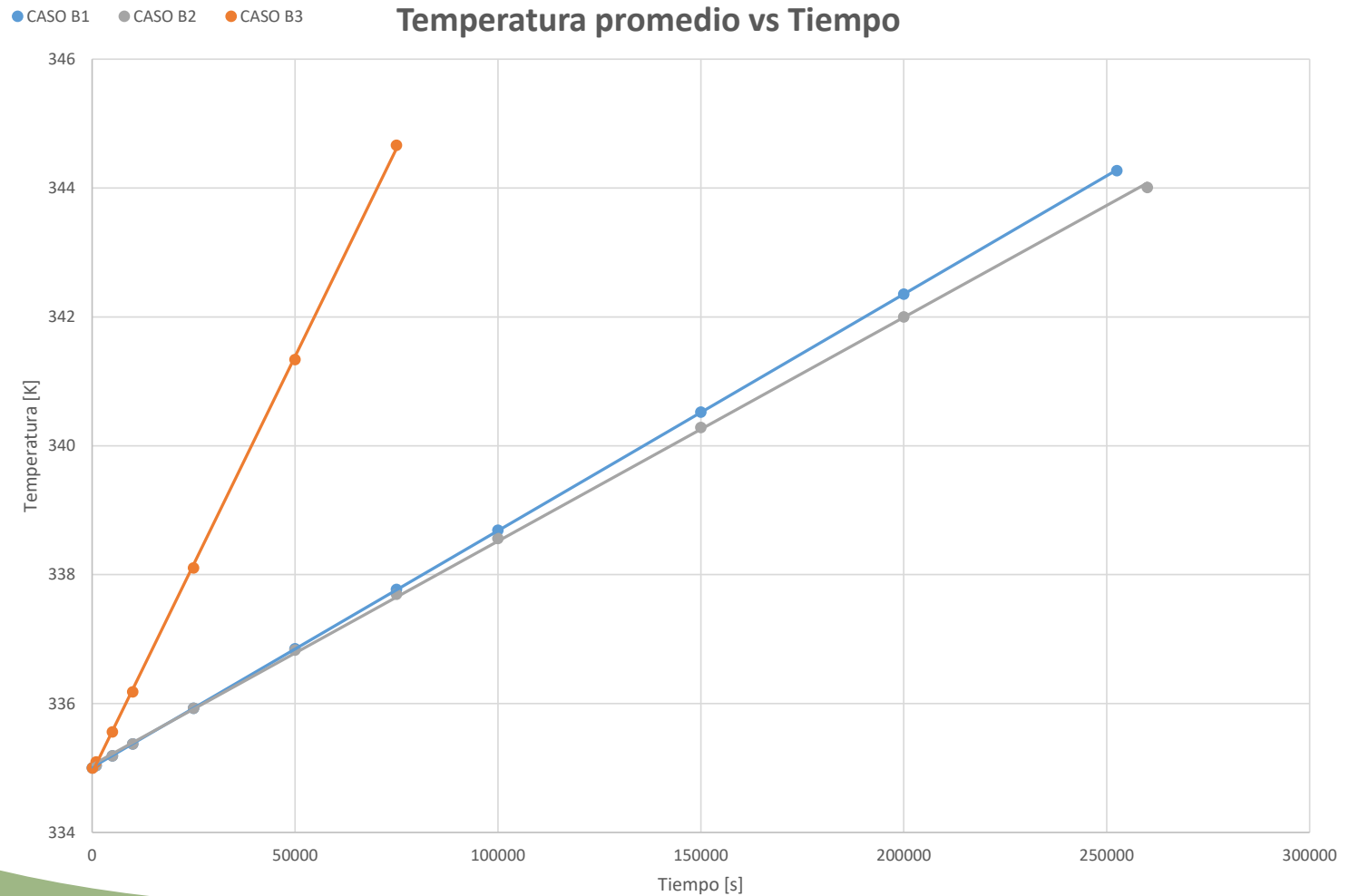


COMPARACIÓN DE RESULTADOS



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

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



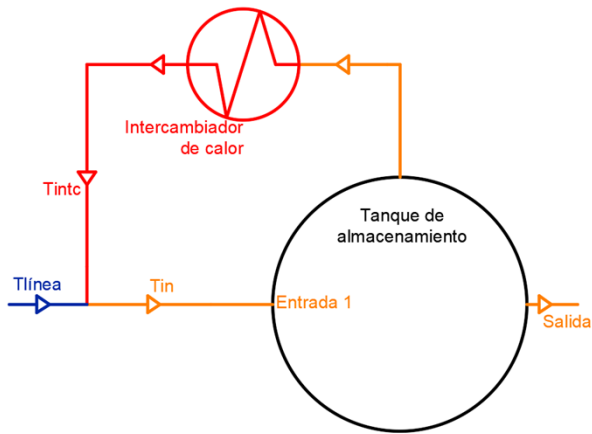
CASO A

Calentamiento hasta estabilizar la temperatura del crudo

Tiempo = 86400 [s]

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

$$\text{Costo} = \$ 1\ 157\ 760$$



RESULTADOS

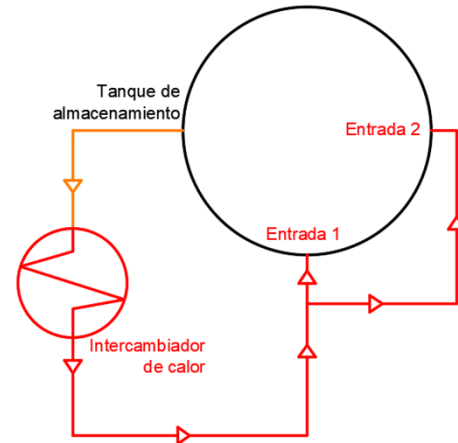
CASO B1 y B2

Calentamiento desde 335 [K] con una y dos entradas

Tiempo = 250000 [s]

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

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



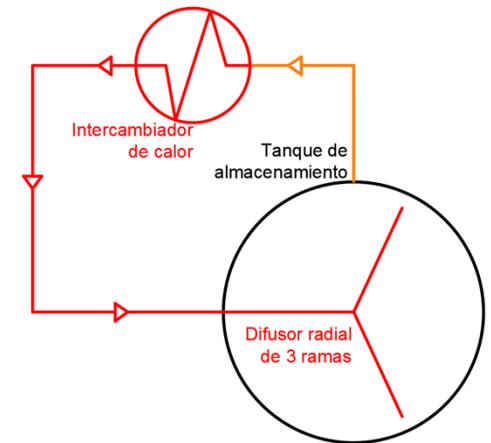
CASO B3

Calentamiento desde 335 [K] con difusor radial

Tiempo = 75000 [s]

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

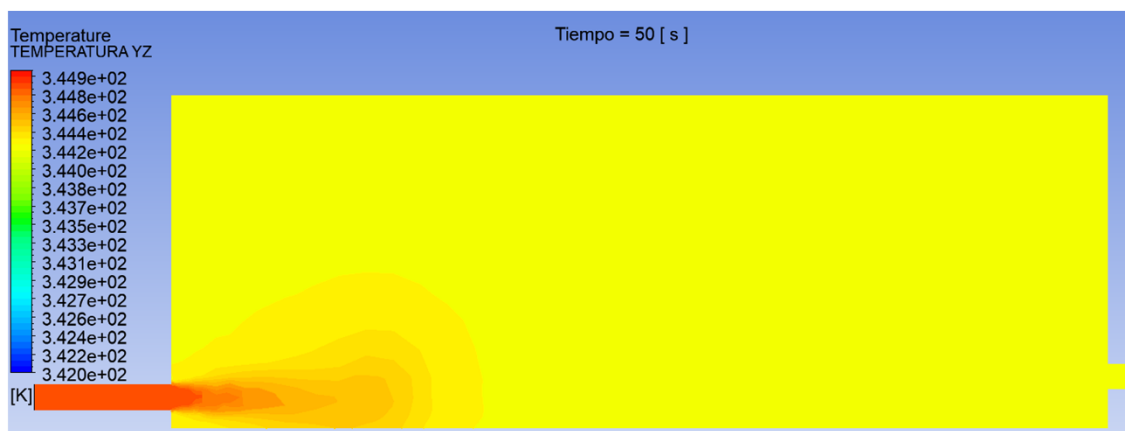
$$\text{Costo} = \$ 1\ 025\ 100$$



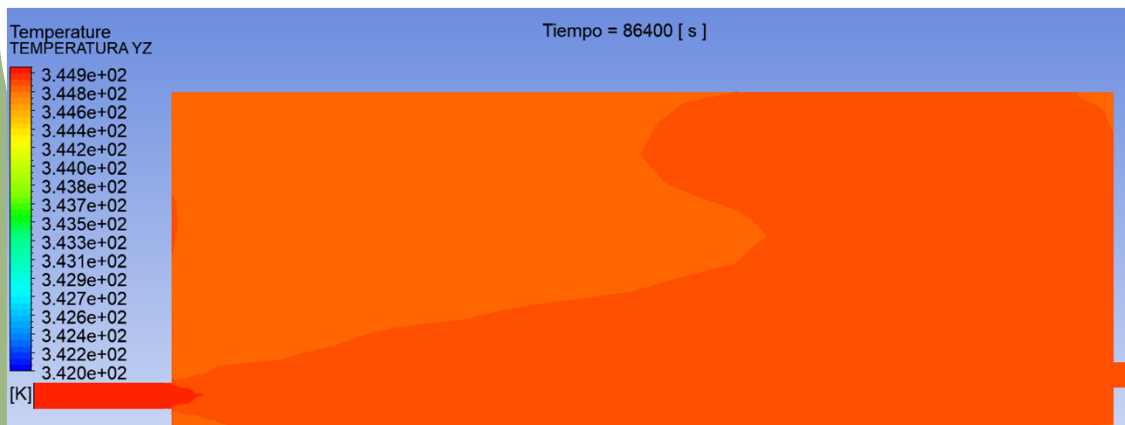


CONCLUSIONES

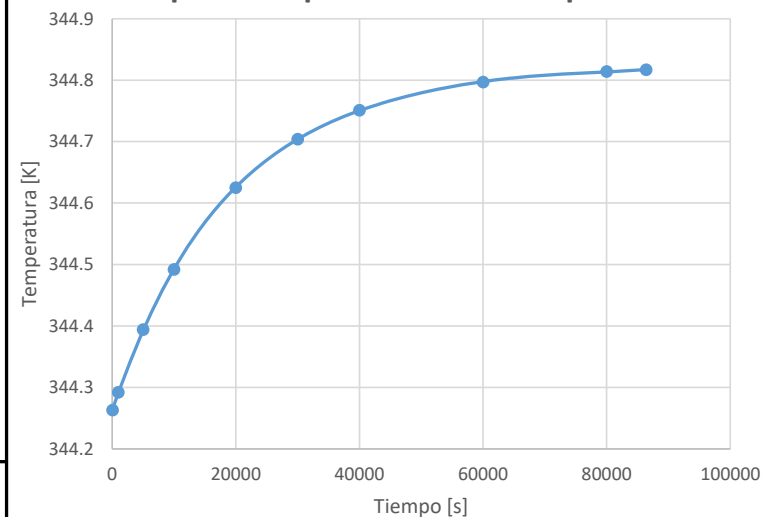
Distribución de temperatura inicial del crudo



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



Temperatura promedio vs Tiempo

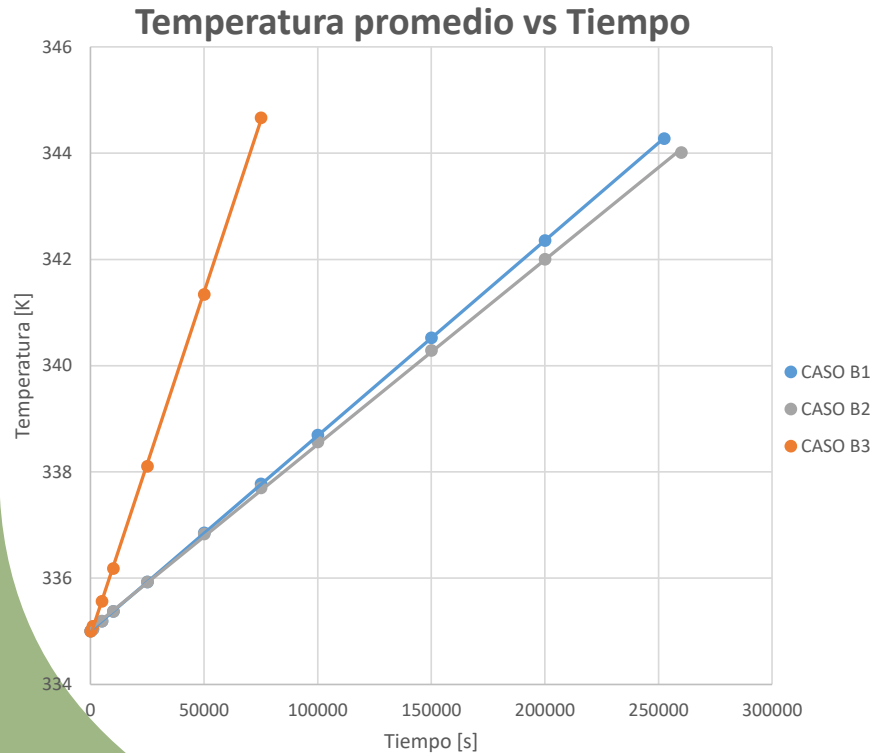


CASO A

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

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

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