



## EXTRATO PIROLENHOSO R01/2021

### RELATÓRIO TÉCNICO

- Análise de CFD em chaminés de fornos: condensação de gases.

07/DEZ/2021

## 1. INTRODUÇÃO

Simulações de escoamento de fluidos utilizando técnicas de *CFD* (*Computational Fluid Dynamics - Dinâmica dos Fluidos Computacional*) foram empregadas no problema de dimensionamento de sistemas de chaminés de fornos, com a finalidade de calcular a taxa de condensação do vapor ao longo das chaminés de dois fornos – forno F19 e F30, e compará-los com os dados provenientes de testes experimentais. A partir do modelo desenvolvido, pode-se determinar uma geometria ótima em termos de comprimento e inclinação do duto da chaminé, de forma a maximizar a coleta do condensado. Os fornos estudados são ilustrado elas figuras 1a e 1b, respectivamente, forno F-19 e F-30.

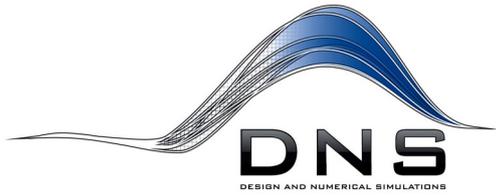
Figura 1 – Exemplo de geometria a serem modelados e analisados via *CFD*



Fig 1a – Ilustração do forno 19.



Fig 1b – Ilustração do forno 30 (antigo)



[contato@dnsimulations.com.br](mailto:contato@dnsimulations.com.br)

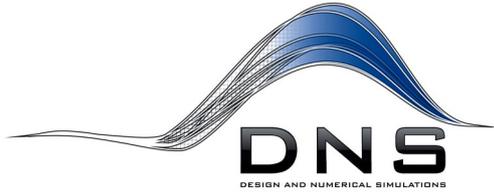
<http://www.dnsimulations.com.br>

CNPJ 14.004.160/0001-13

## 2. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES

Foi desenvolvido um modelo numérico utilizando técnicas de *CFD* para a solução das equações do escoamento – equações de *Navier-Stokes* – em regime transitório, turbulento e multifásico de forma a se obter a topologia detalhada do escoamento ao longo da tubulação, com a completa determinação dos campos de velocidades, temperatura e pressões das fases líquidas e gasosas (vapor) no interior do domínio de cálculo (tubulação - chaminé), levando em consideração as propriedades físicas média dos gases na entrada e saída do domínio computacional e do líquido condensado durante o processo. Na parede da tubulação foi imposta uma condição de contorno de transferência de calor com acoplamento da condução térmica dos materiais de construção mecânica com um coeficiente convectivo de transferência de calor,  $h$ , definido para o ambiente externo à chaminé.

O modelo foi desenvolvido usando uma plataforma de *softwares* baseado no *OpenFOAM*<sup>®</sup> juntamente com *softwares* acessórios (*gnuplot* e *Paraview*), tanto para geração de malha como para processamento e pós-processamento. Esse conjunto de ferramentas chamado de *OpenFOAM* possui uma extensa gama de recursos para resolver problemas de escoamentos complexos envolvendo reações químicas, turbulência, transferência de calor, escoamento multifásico, entre outros. Um modelo matemático capaz de prever a mudança de fase condensação/evaporação foi empregado, tanto para utilização de condições de contornos adequadas para esse tipo de simulação (provenientes de testes em campo), quanto para determinar quantidades específicas inerentes ao sistema, como por exemplo: calcular a condensação dos gases na “chaminé” em função de suas características geométricas.



[contato@dnsimulations.com.br](mailto:contato@dnsimulations.com.br)

<http://www.dnsimulations.com.br>

CNPJ 14.004.160/0001-13

### 3. ABORDAGEM MATEMÁTICA, NUMÉRICA E CONDIÇÕES DE CONTORNOS

Nesta seção, serão descritos os modelos matemáticos e numéricos utilizados, bem como as condições de contorno impostas ao problema.

#### 3.1 Modelo Matemático

O modelo numérico foi concebido com a finalidade de simular as chaminés dos fornos, denominados F-19 e F-30, com o intuito de determinar a taxa de condensação dos gases de escape (aqui tratados como vapor de água) e na sequência compará-los aos dados provenientes da experimentação. Após realizado a validação numérica/experimental, o modelo está sendo empregado na busca de uma geometria otimizada que propicie um maior desempenho no que tange a condensação dos gases, relacionados aos parâmetros geométricos: comprimento e ângulo de inclinação da tubulação.

As equações completas de *Navier-Stokes* (equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e energia) foram resolvidas em regime transitório, utilizando o modelo de turbulência *k-omega SST*.

#### 3.2 Condições de Contorno

As condições de contorno foram tomadas a partir das tabelas fornecidas pela Extrato Pirolenhoso para o forno F-30 (Figura 2) e para o forno F-19 (Figura 3). Os valores adotados para as condições de contornos usadas foram tomadas como a média simples dos testes nominados AM 01, 02 e 03.

As especificações de materiais e dimensões geométricas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características geométrica e propriedades térmicas dos materiais.

Geometrias	Material	Condutividade Térmica	Comprimento	Diâmetro	Ângulo de Inclinação
<b>F-30</b>	aço galvanizado	52 [W/m/K]	6 m	150 mm	30 graus
<b>F-19</b>	PVC	0.21 [W/m/K]	9 m	100 mm	15 graus

DADOS DA AMOSTRA				
Identificação do Ponto:	Forno 19			
Data das Amostragens:	29/10/2021			
Número das Amostras:		49459-17	49460-17	49461-17
Horários das Amostragens:		07:20	08:45	10:30
<b>Parâmetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>AM 01</b>	<b>AM02</b>	<b>AM03</b>
Temperatura	°C	59,3	53,6	53,6
Umidade	%	2,9	2,9	6,0
Área Da Chaminé/Duto	m <sup>2</sup>	0,008	0,008	0,008
Velocidade Do Gás	m/s	3,1	2,7	2,9
Vazão (Condições Duto)	m <sup>3</sup> /h	89,0	77,3	81,5
Vazão (CNTP – 0° C e 1 ATM)	Nm <sup>3</sup> /h	67,5	59,6	60,9
Concentração de MP	mg/Nm <sup>3</sup>	1.010,6	882,6	492,6
Taxa de Emissão MP	Kg/h	0,1	0,1	0,0
Incerteza <sup>(1)</sup> - MP	U (±)	15,2	15,2	15,2
<b>Concentração de MP – 8% O<sub>2</sub></b>	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>980,4</b>	<b>869,2</b>	<b>477,9</b>
Taxa de Emissão MP – 8% O <sub>2</sub>	Kg/h	0,07	0,05	0,03
<b>Concentração de CO</b>	<b>%</b>	<b>3,6</b>	<b>3,4</b>	<b>3,8</b>
<b>Concentração de CO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>9,6</b>	<b>10,0</b>	<b>9,6</b>
<b>Concentração de N<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>79,2</b>	<b>78,8</b>	<b>79,0</b>
<b>Concentração de O<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>7,6</b>	<b>7,8</b>	<b>7,6</b>
Isocinética	%	104	102	105
Tempo Da Coleta	min	60	60	60

<sup>(1)</sup> A incerteza expandida (U) relatada é baseada na incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência k=2, para um nível de confiança de 95%, calculada conforme o GUM 2012.

Figura 2- Dados experimentais para o forno F-30

DADOS DA AMOSTRA				
Identificação do Ponto:	Forno 30			
Data das Amostragens:	28/10/2021			
Número das Amostras:		49447-17	49448-17	49449-17
Horários das Amostragens:		14:40	16:15	17:44
Parâmetros	Unidades	AM 01	AM02	AM03
Temperatura	°C	83,5	83,0	83,1
Umidade	%	3,9	4,0	4,0
Área Da Chaminé/Duto	m <sup>2</sup>	0,008	0,008	0,008
Velocidade Do Gás	m/s	3,1	3,3	3,3
Vazão (Condições Duto)	m <sup>3</sup> /h	88,7	92,4	92,5
Vazão (CNTP – 0° C e 1 ATM)	Nm <sup>3</sup> /h	62,0	64,6	64,6
Concentração de MP	mg/Nm <sup>3</sup>	1.479,5	1.101,7	1.421,1
Taxa de Emissão MP	Kg/h	0,1	0,1	0,1
Incerteza <sup>(1)</sup> - MP	U (±)	22,1	22,1	22,1
<b>Concentração de MP – 8% O<sub>2</sub></b>	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>	<b>1.414,2</b>	<b>1068,8</b>	<b>1378,7</b>
Taxa de Emissão MP – 8% O <sub>2</sub>	Kg/h	0,09	0,07	0,09
<b>Concentração de CO</b>	<b>%</b>	<b>3,8</b>	<b>3,6</b>	<b>3,6</b>
<b>Concentração de CO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>9,6</b>	<b>9,6</b>	<b>9,6</b>
<b>Concentração de N<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>79,2</b>	<b>79,2</b>	<b>79,2</b>
<b>Concentração de O<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>7,4</b>	<b>7,6</b>	<b>7,6</b>
Isocinética	%	109	109	108
Tempo Da Coleta	min	60	60	60

<sup>(1)</sup> A incerteza expandida (U) relatada é baseada na incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência k=2, para um nível de confiança de 95%, calculada conforme o GUM 2012.

Figura 3- Dados experimentais para o forno F-19.

É importante registrar que para o forno F-30 o volume coletado durante um ciclo de 04 dias de condensados foi de 420 litros, enquanto para o forno F-30, para o mesmo período, foi de 220 litros. Uma razão de **2,05 vezes** mais de condensados coletados para a configuração F-19.

O domínio de cálculo para as chaminés consta de uma tubulação onde em uma das extremidades estabeleceu-se a região circular definida como sendo saída (dos vapores não condensados) e na outra meia circunferência

delimitando a região de entrada de vapor proveniente dos fornos (amarelo na Figura 4) e a outra metade indicada por uma região de saída (vermelho também na Figura 4), por onde foi determinado a vazão de fluido condensado.

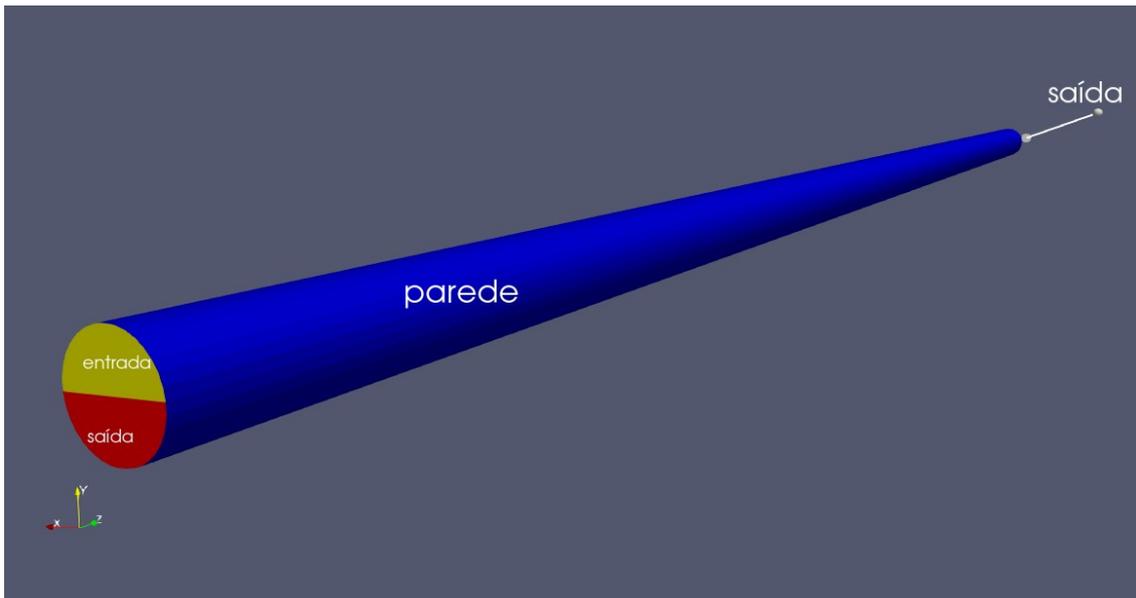
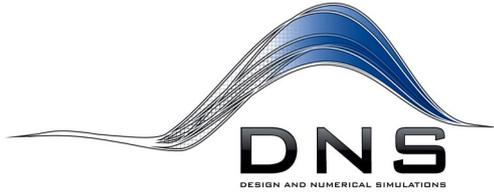


Figura 4 – Domínio de Cálculo.

O ângulo de inclinação das tubulações foram modelados usando-se componentes projetadas da aceleração da gravidade.

### 3.3 Método de Solução (Modelo Numérico)

A solução do sistema de equações diferenciais parciais que modelam este problema foi determinada por meio da discretização da geometria aplicando a técnica de volumes finitos. O sistema de equações resultantes foi resolvido por interpolação polinomial de segunda ordem e o acoplamento da pressão-velocidade foi feito por meio do esquema conhecido como *SIMPLE*. Para tanto, foi empregada uma malha estruturada – hexagonal - para a análise



[contato@dnsimulations.com.br](mailto:contato@dnsimulations.com.br)

<http://www.dnsimulations.com.br>

CNPJ 14.004.160/0001-13

em questão (foram utilizadas três níveis de refinamento de malha, a fim de verificar a independência dos resultados, Figura 5). O *solver* é empregado para dois fluidos, não isotérmico, imiscíveis, com mudanças de fases entre fluidos com fase líquida e vapor (evaporação e condensação). Será usada uma técnica de *VoF (Volume of Fluid)* que é baseado na captura da interface da fração de fases. O sistema de equações algébricas foi então resolvido por um processo iterativo segregado, utilizando um *multigrid solver* aplicado às equações de quantidade de movimento. A convergência foi tomada segundo a avaliação de vários resíduos. Em adição, a evolução da temperatura, pressão e velocidade foi monitorada em vários pontos dentro do domínio computacional e a convergência foi determinada quando tais valores de pressão e velocidade indicaram uma tendência assintótica para o regime permanente (mesmo calculando em regime transitório, o escoamento tende para um regime estacionário). Foi avaliada a conservação de massa durante o processo de convergência numérica, levando em consideração as duas fases concorrentes no sistema.

A Figura 5 apresenta a malha computacional utilizada no domínio interno. É mostrada apenas a malha superficial – a malha em questão é a utilizada na chaminé do forno F30, similar topologicamente a utilizadas nos demais casos. A malha computacional considerada tem aproximadamente 410 mil elementos.

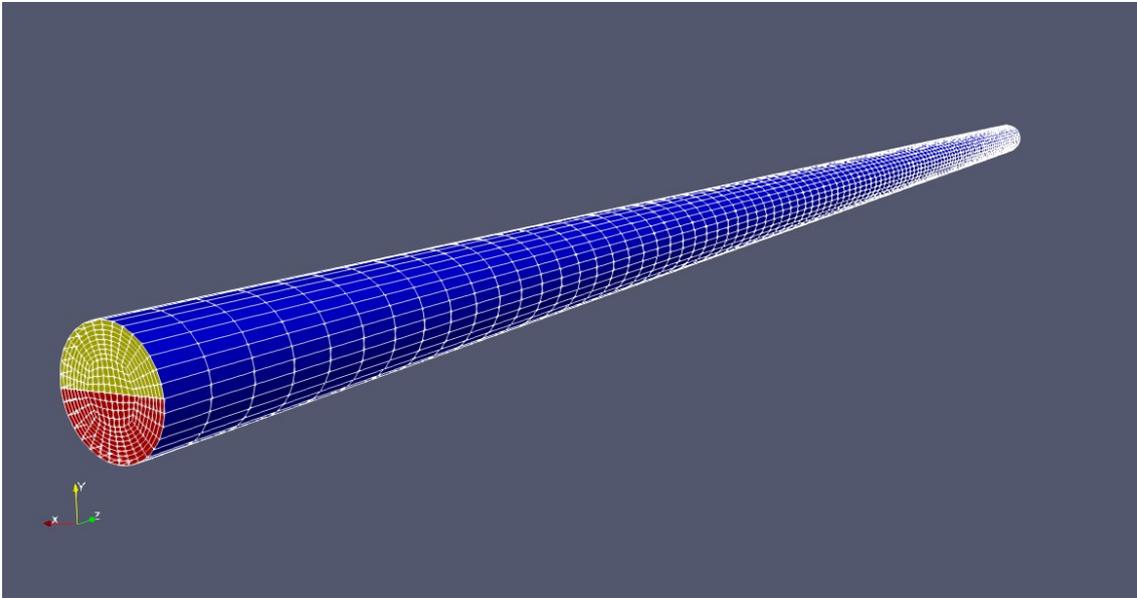


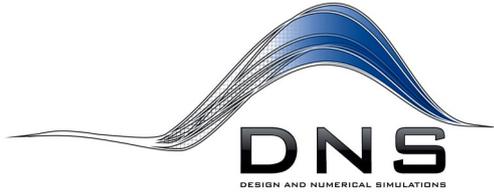
Figura 5 – Malha computacional – superficial.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e promove discussões a respeito dos equipamentos analisados.

### 4.1 Considerações Iniciais

A estratégia de cálculo utilizada neste trabalho para a obtenção dos resultados, que serão apresentados a seguir, é genérica o suficiente para determinar a formação de condensados em chaminés, levando em consideração a temperatura do vapor em um ponto genérico do domínio, representadas pela linha 01 das Figuras 2 e 3, respectivamente para o F-30 e F-19, bem como as velocidades do vapor identificadas na linha 04 das mesmas



[contato@dnsimulations.com.br](mailto:contato@dnsimulations.com.br)

<http://www.dnsimulations.com.br>

CNPJ 14.004.160/0001-13

figuras. O modelo também leva em consideração o material de construção mecânica das tubulações, representados no modelo pelos valores das conduções térmicas (aço galvanizado para a F-30 e PVC para F-19), além das condições convectiva ambientais (adotado  $h = 20 \text{ [W/m}^2\text{/K]}$  para ambos fornos, simulando condições ambientais convectivas iguais para os fornos em questão).

#### 4.2 Resultados obtidos para as configurações F-19 e F-30

O Gráfico 1 sintetiza os resultados obtidos por CFD para as simulações dos fornos F-30 e F-19. A porção transitória representada por tempos menores que 15 segundos podem ser desconsiderados por se tratarem de resultados não convergidos, provenientes da inicialização do escoamento no interior do tubo, até a obtenção de escoamento em regime. É notório que a partir de transitório numérico a vazão dos condensados estabilizam em um patamar constante, mostrando que o fenômeno de condensação atinge um regime estacionário em ambas tubulações, o que permite uma comparação direta entre os resultados numéricos e os dados experimentais.

A razão experimental entre os volumes de condensados do forno F-19 com relação ao F-30, enunciada na seção 3.2, é de **2,05** (F-19 produz 2,05 vezes o condensado produzido por F-30, medidos durante 4 dias). A relação encontrada via *CFD* foi de **2,25**.

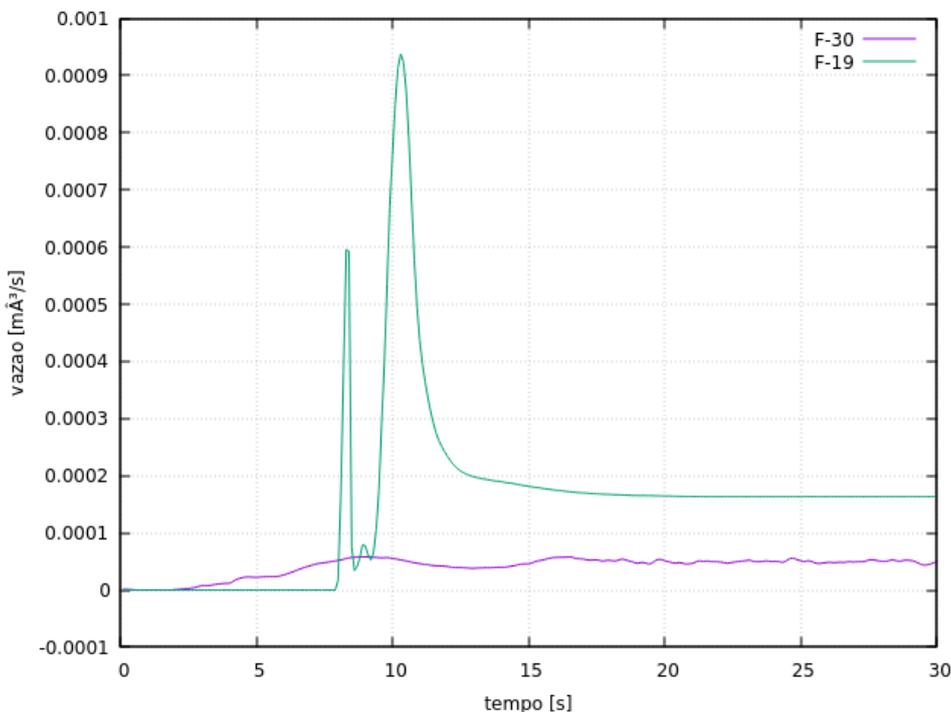


Gráfico 1 – Vazão de condensados medidos na saída inferior da chaminé

A discrepância encontrada entre os resultados experimentais e os numéricos deve-se, principalmente, as incertezas relacionadas as temperaturas do vapor adotadas como condição de contorno, ou seja, os valores experimentais fornecidos pelas tabelas identificadas na seção 2 como figuras 1 e 2, reportadas logo na primeira linha de cada tabela.

A Figura 6(a-e) e 7(a-e) mostra a evolução da formação de condensados na parede da tubulação, respectivamente para o forno F-19 e o F-30. As cores quentes (vermelhas) apresentam a formação dos condensados no interior das chaminés, enquanto as cores frias (azuis) apresentam a fração de vapor na mesma região.

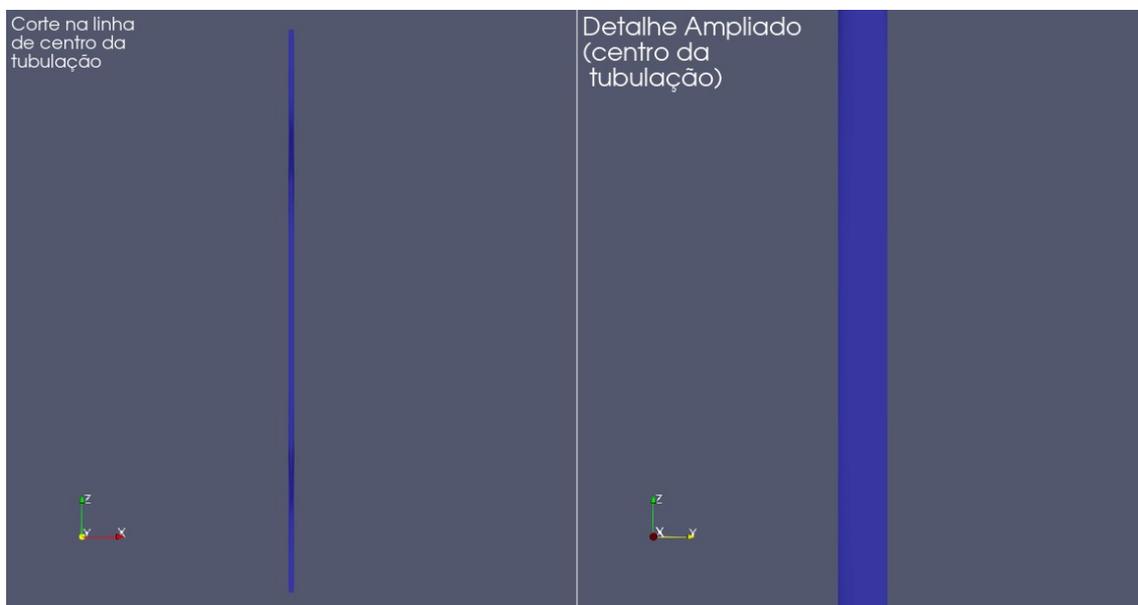


Figura 6a- Desenvolvimento da camada de condensação

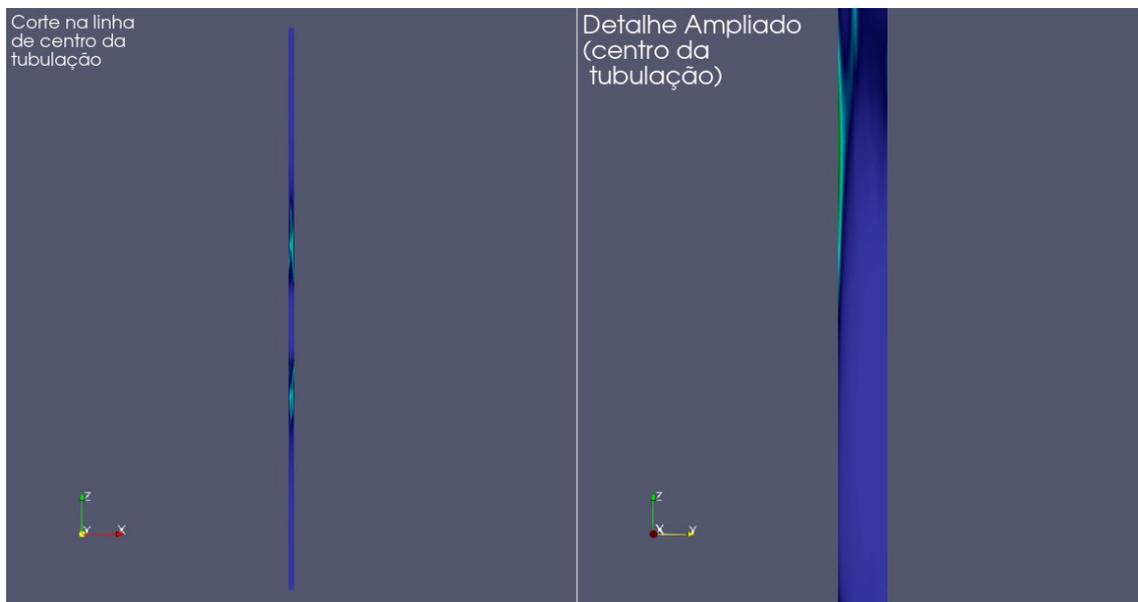


Figura 6b Desenvolvimento da camada de condensação

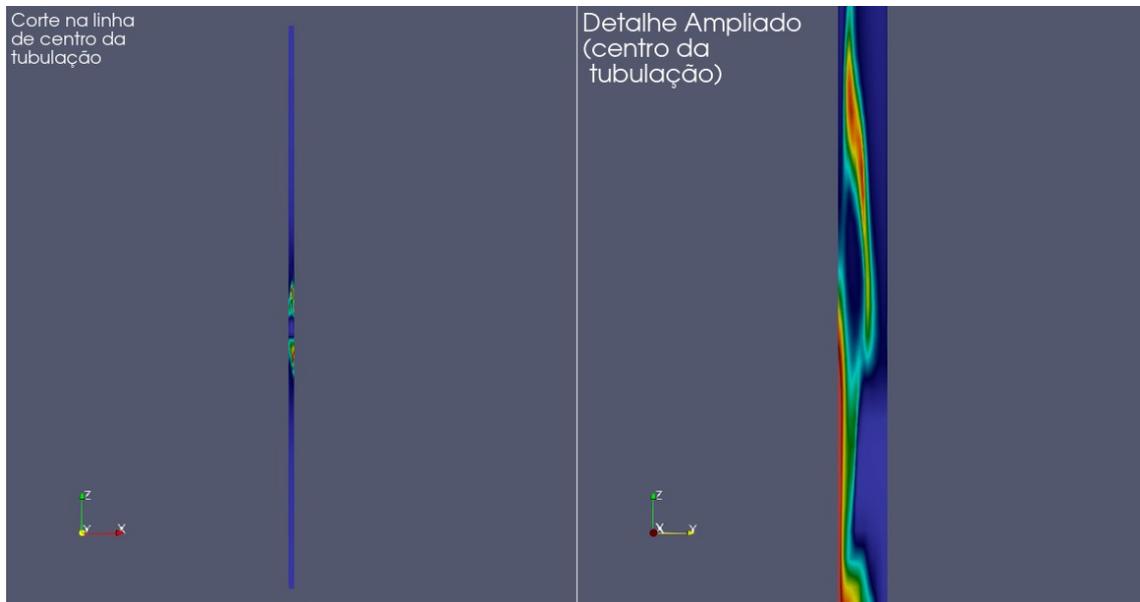


Figura 6c Desenvolvimento da camada de condensação

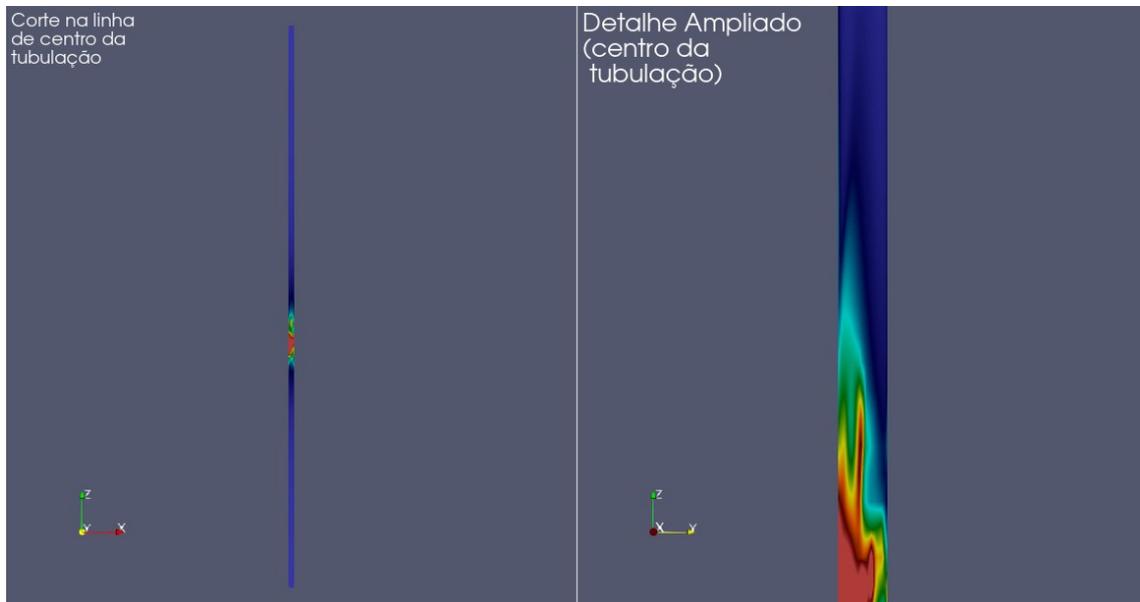


Figura 6d Desenvolvimento da camada de condensação

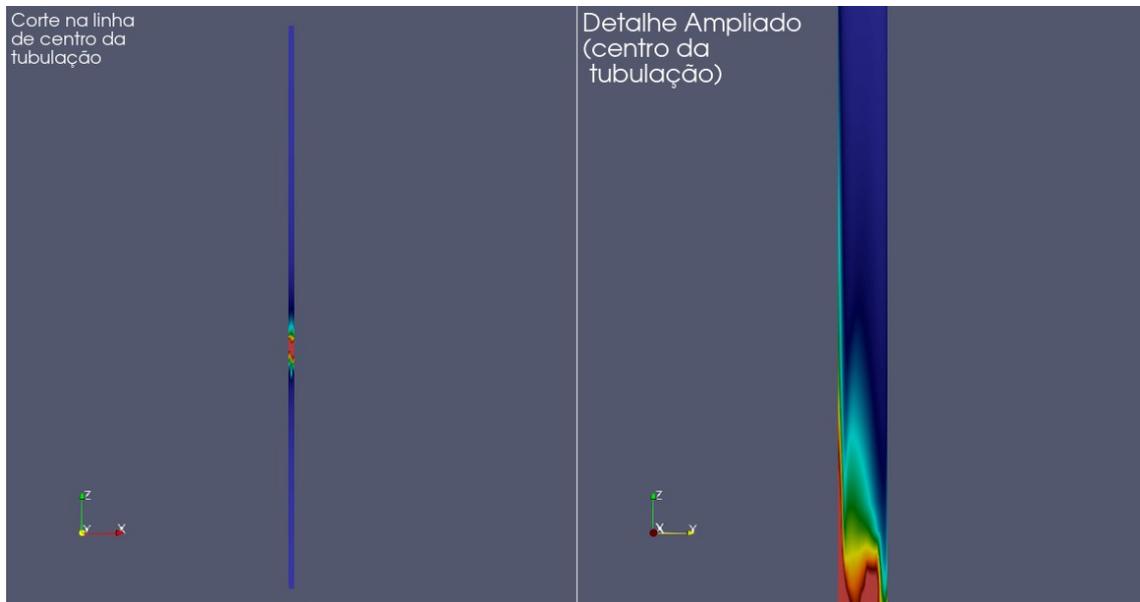


Figura 6e Desenvolvimento da camada de condensação

Figuras 6 (a-e). Sequência de formação de condensados no interior da tubulação do forno F-19

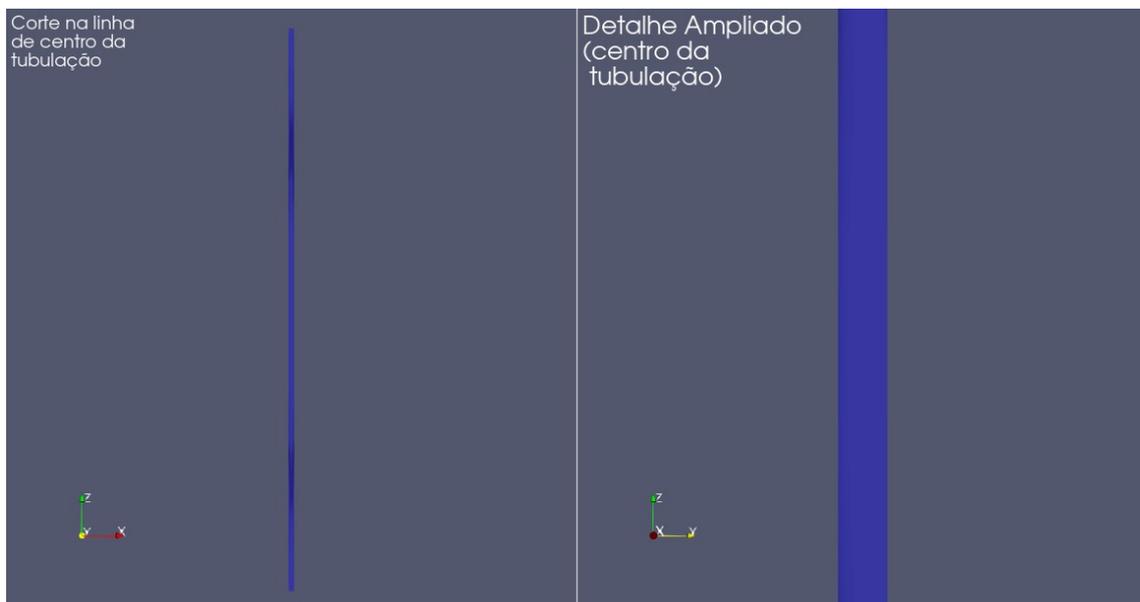


Figura 7a Desenvolvimento da camada de condensação

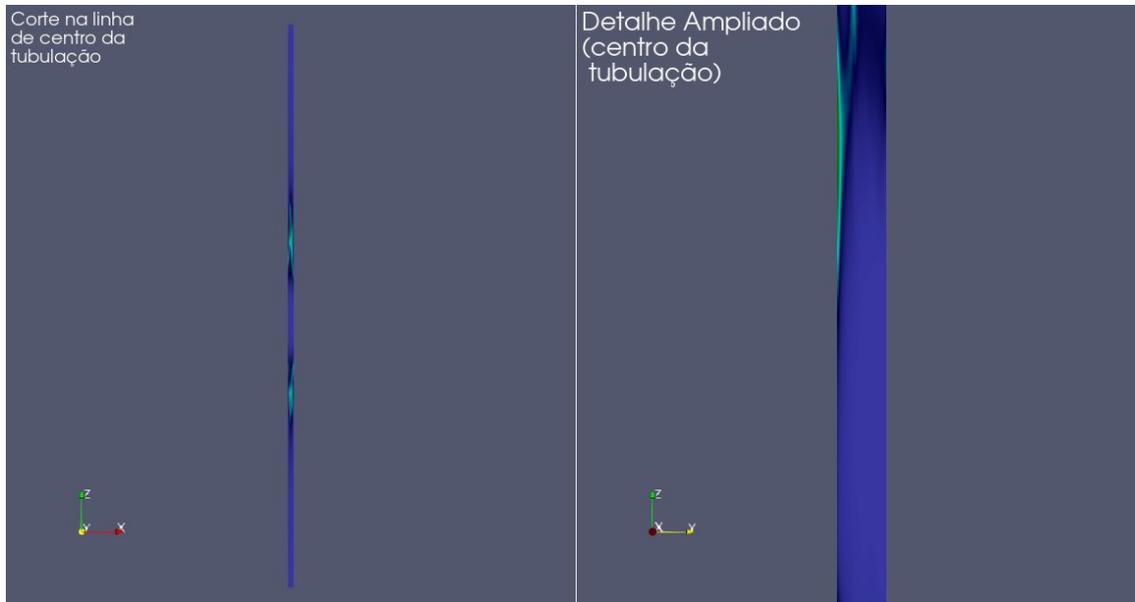


Figura 7b Desenvolvimento da camada de condensação

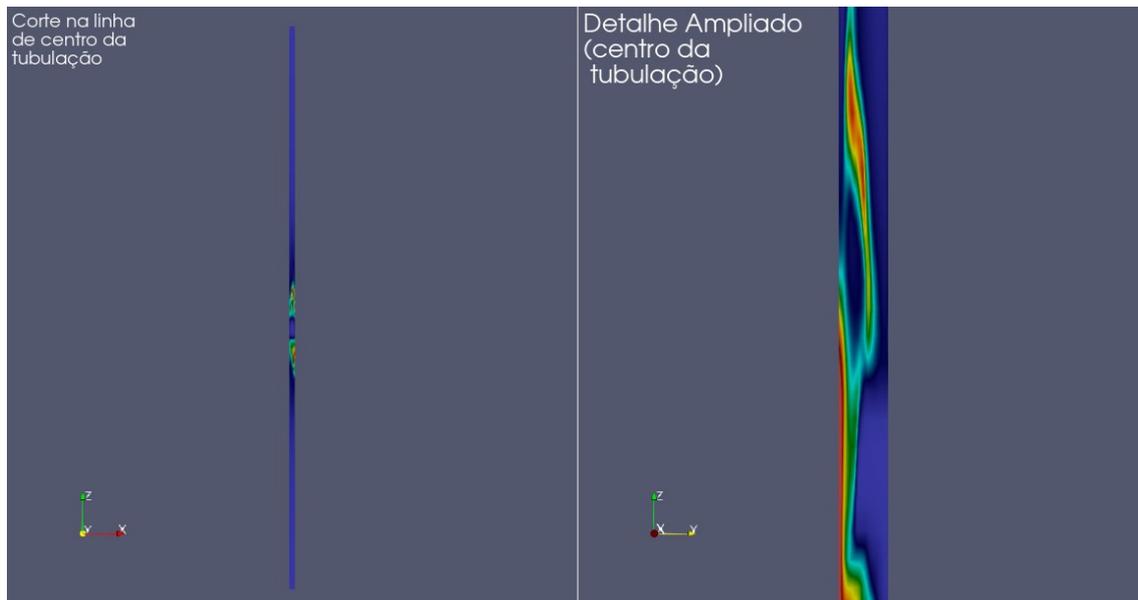


Figura 7a Desenvolvimento da camada de condensação

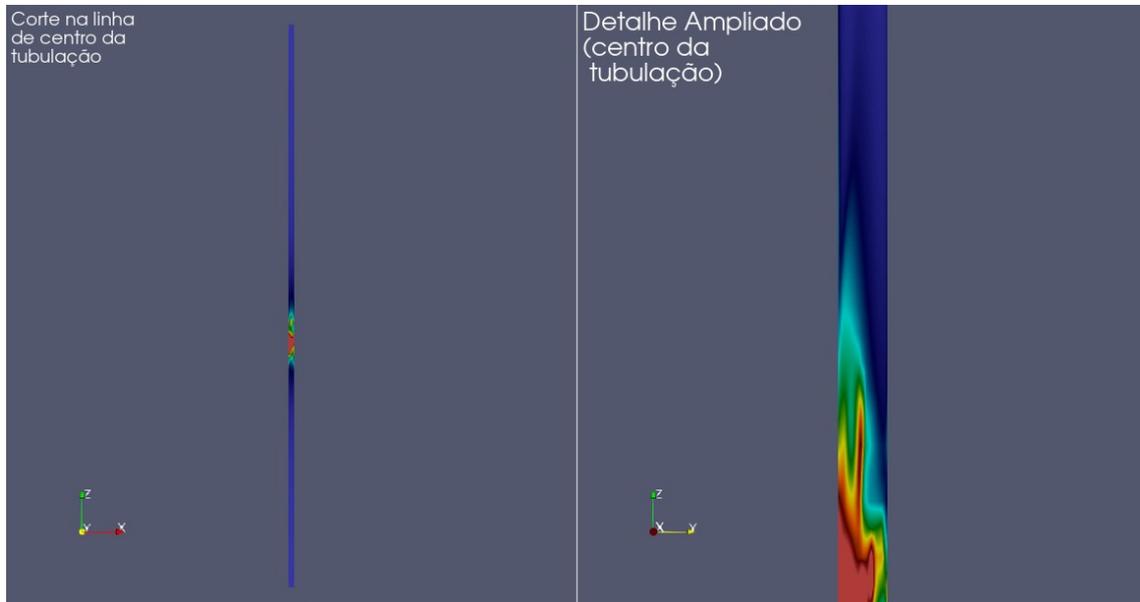


Figura 7d Desenvolvimento da camada de condensação

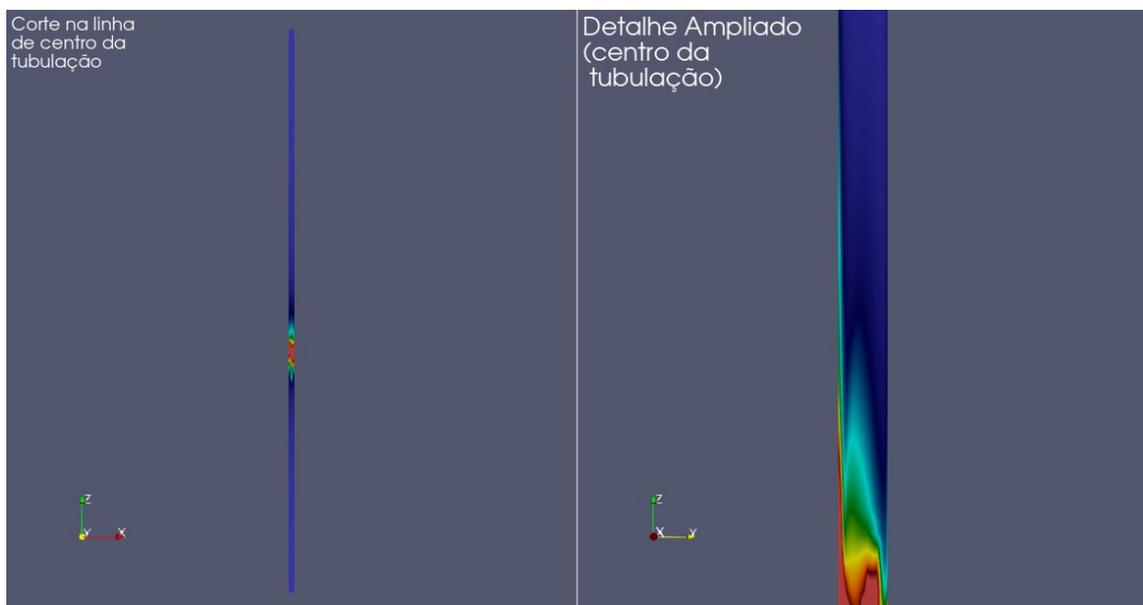
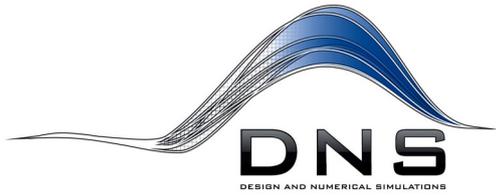


Figura 7d Desenvolvimento da camada de condensação

Figuras 7 (a-e). Sequência de formação de condensados no interior da tubulação



contato@dnsimulations.com.br  
<http://www.dnsimulations.com.br>  
CNPJ 14.004.160/0001-13

Mesmo com as incertezas apontadas, relacionadas aos dados experimentais incertos, o modelo numérico desenvolvido será capaz de otimizar a geometria da tubulação, inicialmente utilizando apenas parâmetros geométricos, a saber: comprimento e ângulo de inclinação e futuramente outros parâmetros, tais como diâmetro e material construtivo, uso de aletas, chicanes ou até mesmo serpentinas externas para resfriamento da chaminé, entre outros. A comparação e a identificação de possíveis ganhos serão sempre referidos ao modelo simulado via *CFD* identificado por forno F-19.

#### 4.3 Resultados obtidos usando a otimização paramétrica para o forno F-19

De posse dos resultados promissores reportados na seção anterior (4.2), foi montada uma matriz de experimentos numéricos (Tabela-2) e após simuladas, foram comparadas ao caso de referência F-19.

Foram considerados 4 ângulos de inclinação da tubulação com relação a horizontal, ou seja, 15°, 30°, 45° e 60° e outros 4 comprimentos, 6 metros, 9 metros, 12 metros e 15 metros, perfazendo 16 casos simulados. Todos os outros parâmetros e/ou condições de contornos foram fixados iguais a simulação de referência indicado em azul, pela letra E na Tabela-2.

A simulação F-19 foi ajustada com os dados experimentais, ou seja, o modelo foi calibrado para reproduzir exatos 450 litros de condensados em um período de 72 horas (3 dias) por 3 chaminés. De modo que todas as outras simulações foram comparadas por diferenças percentuais com a referência (reportada pela letra E na Tabela 2).

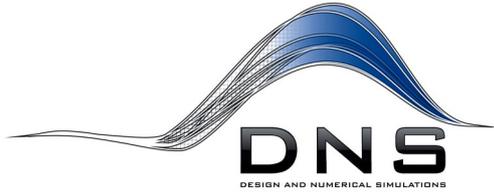
Em vermelho, estão expostos as configurações cujos resultados ficaram abaixo da referência, E – F-19.

Tabela 2 – Matriz de experimentos numéricos

Caso	comp. (m)	Ângulo (°)	Diferença %	Condensados em litros (72 horas, produzidas por 3 chaminés)
A	6	15	-33,6%	299
B	6	30	-33,1%	301
C	6	45	-33,8%	298
D	6	60	-33,5%	300
F-19—E	9	15	0,0%	450
F	9	30	0,4%	452
G	9	45	-2,7%	438
H	9	60	0,2%	452
I	12	15	34,6%	606
J	12	30	35,0%	608
L	12	45	34,3%	605
M	12	60	33,7%	602
N	15	15	56,6%	706
O	15	30	64,8%	742
P	15	45	66,3%	749
Q	15	60	66,8%	751
R	10	15	11,0%	500
S	10	30	14,8%	517

É possível observar que o aumento no comprimento do duto tem impacto positivo na produção de condensados. Fisicamente, esse fenômeno pode ser explicado pelo maior tempo de permanência do vapor em contato com a parede do duto onde ocorre a condensação. Para valores de comprimento menores que 9 metros, como era de se esperar, a formação de condensados são menores que a apresentada pela referência.

Os resultados mostram que para ângulo de inclinação de 15°, os valores de condensados são inferiores, especialmente para os valores de tubulação de comprimentos maiores; para os ângulos de 30°, 45° e 60° os resultados são marginalmente iguais, mostrando que não ocorre variação perceptível para ângulos entre 30° e 60°.



[contato@dnsimulations.com.br](mailto:contato@dnsimulations.com.br)

<http://www.dnsimulations.com.br>

CNPJ 14.004.160/0001-13

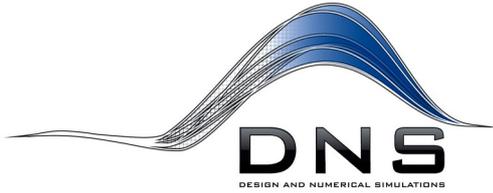
## 5. CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido mostrou-se eficiente para reproduzir os resultados experimentais, apresentando diferenças da ordem de 10% entre os resultados de *CFD* e os dados experimentais, para a razão de coleta de condensados entre os fornos modelados. A razão experimental foi de 2,05 em prol do forno F-19, enquanto a determinada via *CFD* foi de 2.25 também em prol ao forno F-19. Pode-se inferir que a discrepância encontrada é fundamentalmente pelas incertezas imputadas a temperatura dos gases medidas, que servem de dados de entrada para o modelo numérico.

Os resultados numéricos mostram que comprimentos crescente da tubulação é acompanhado de um aumento progressivo na produção de condensados e os melhores desempenhos ocorrem para inclinação entre 30° e 60° com relação a horizontal. Não foi observado inflexão na tendência de aumento da formação de condensados relacionados a um aumento do comprimento da tubulação.

Fixando um valor máximo de 10 metros para o comprimento, o ciclo de otimização mostrou que o maior desempenho encontra-se para uma tubulação de 10 metros e ângulo de inclinação de 30°, com predição de formação de 517 litros de condensado para o período considerado (linha S da tabela 2). Com isso, teríamos um aumento na produção em cerca de 15% a mais, com relação ao forno F-19 (linha E da mesma tabela 2).

Atenciosamente,



[contato@dnsimulations.com.br](mailto:contato@dnsimulations.com.br)

<http://www.dnsimulations.com.br>

CNPJ 14.004.160/0001-13

**Aluisio Viais Pantaleão, Dr.**  
Diretor  
[aluisio@dnsimulations.com.br](mailto:aluisio@dnsimulations.com.br)  
Fone: (12) 99745-1245

**Ricardo Becht Flatschart, Dr.**  
Diretor Presidente  
[ricardo@dnsimulations.com.br](mailto:ricardo@dnsimulations.com.br)  
Fone: (11) 98168-8246