

Rio de Janeiro, 06 de dezembro de 2019.
ALI.T-0385/19

Ao Senhor
Jônatas Souza da Trindade
Diretor de Licenciamento Ambiental do
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos
Recursos Naturais Renováveis DILIC - IBAMA
SCEN - Trecho 2 - Edifício Sede / Bl. C
CEP: 70818-900 - Brasília - DF

Assunto: **Condição Específica 2.1**
Licença Nº 1310/2019
Processo de Licenciamento
Ambiental da UAS
Nº 02001.007599/2018-65

Senhor Diretor,

Em atendimento à Condição Específica 2.1 da Licença Nº 1310/2019, encaminhamos em anexo cópia da Revisão 5 do Relatório Técnico de Simulação Numérica da Dispersão Térmica no Entorno da UAS (**BP-U-UAS-190003**).

Estamos à disposição para os esclarecimentos adicionais que se fizerem necessários.

Atenciosamente,



Paulo Augusto Gonçalves
Assessor de Licenciamento Nuclear e Ambiental

CNPJ: 42.540.211/0002-48



Electronics
Department

10th December 2013
11:00 AM

10th December 2013
11:00 AM
10th December 2013
11:00 AM

10th December 2013
11:00 AM
10th December 2013
11:00 AM

10th December 2013
11:00 AM
10th December 2013
11:00 AM

10th December 2013
11:00 AM

10th December 2013
11:00 AM

10th December 2013
11:00 AM

ASSUNTO/MOTIVO

PÁGINA

1/17

LOCAL/DATA

Rio, 05-dezembro-2019

REDATOR

Leon Lima

U.O./TEL

DSR.T/7813

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO TÉRMICA NO ENTORNO DA UAS

REFERÊNCIA

UAS

CÓDIGO ARQUIVO

Nº DE PÁGINAS 17

ANEXOS 0

RESUMO

Este relatório apresenta o resultado do estudo da dispersão térmica no entorno da UAS. O estudo foi realizado por meio de uma modelagem CFD com o objetivo de avaliar o impacto da operação da UAS e da dissipação do calor de decaimento dos Elementos Combustíveis armazenados em seu entorno.

As simulações levaram em conta as condições meteorológicas locais e avalia a influência em 3 pontos de interesse.

A conclusão deste estudo, que empregou uma metodologia com premissas conservadoras e considera carga térmica máxima, é que a influência da operação da UAS na temperatura será desprezível para o microclima local, conforme os resultados obtidos da simulação numérica, sumarizados na tabela abaixo.

	Centro de Informações	Heliponto	BR-101 e adjacências
temperatura inicial	36,56 °C	36,56 °C	36,56 °C
temperatura máxima ¹	37,80 °C	37,70 °C	37,70 °C
temperatura média	37,40 °C	37,40 °C	37,30 °C
diferença máxima de temperatura	1,2 °C	1,1 °C	1,1 °C
diferença média de temperatura	0,8 °C	0,8 °C	0,7 °C

¹Resultados correspondentes à condição de vento mais desfavorável, numa faixa de 0 a 5 m/s.

ASSINATURAS

REV.	DATA	PÁG.	VERIFICADO/ APROVADO
01	16/5/19	geral	
02	16/5/19	2,3,7,8 e 11	
03	20/05/19	geral	
04	28/11/19	geral	
05	05/12/19	2 e 11	

LEON LIMA

HITOSHI / FERRARI

AUTOR

VERIFICADO/APROVADO

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é avaliar o efeito da UAS na Área de Influência Direta sob o ponto de vista dos fenômenos térmicos, levando em conta as principais condições climáticas da região que contém a UAS.

A finalidade do empreendimento objeto deste Relatório é armazenar de forma segura Elementos Combustíveis Irrradiados (ECIs) que dissipam uma taxa de calor residual, que decai ao longo do tempo. Os *overpacks* que abrigarão esses elementos são providos de sistemas que permitem a passagem do ar ambiente por canais internos por onde absorvem o calor liberado pelos elementos, promovendo o resfriamento dos ECIs, por meio de convecção natural do ar. Os ECIs, tanto de Angra 1 como de Angra 2, serão transferidos das piscinas de combustíveis usados para a UAS após pelo menos 10 anos de decaimento. Isso corresponde aproximadamente às seguintes cargas térmicas máximas por elemento combustível/3/:

- Angra 1: 0,99 kW
- Angra 2: 1,25 kW

Como os ECIs de Angra 1 e Angra 2 têm dimensões e características distintas, os *overpacks* de Angra 1 e de Angra 2 serão diferentes. O de Angra 1 comporta 37 ECIs e o de Angra 2 comporta 32 ECIs. Em sua capacidade máxima, a UAS armazenará 30 *overpacks* de Angra 1 e 42 *overpacks* de Angra 2/2/, perfazendo uma carga térmica máxima de 2.778,90 kW (Tabela 1). O presente estudo tem como objetivo calcular como essa carga térmica é transportada dentro das condições meteorológicas e topológicas locais no entorno da UAS, de maneira a obter uma avaliação quantitativa de uma eventual influência

- (i) no Centro de Informações de Itaorna (Observatório Nuclear)
- (ii) no Heliponto
- (iii) ao longo do trecho da BR-101 adjacente à CNAAA

Tabela 1. Composição da carga térmica máxima prevista para a UAS.

	nº <i>overpacks</i>	ECIs/ <i>overpack</i>	kW/ECI	kW
Angra 1	30	37	0,99	1098,90
Angra 2	42	32	1,25	1680,00
Potência total UAS:				2778,90

Cabe ressaltar de antemão que a UAS não irá aportar qualquer carga térmica nova ao ambiente, uma vez que sua finalidade é armazenar Elementos Combustíveis já presentes na CNAAA, armazenados nas piscinas de elementos combustíveis das usinas. Atualmente o calor de decaimento dos ECIs acondicionados nas piscinas é dissipado para o mar, através dos respectivos sistemas de arrefecimento das piscinas.

É importante destacar também que, considerando a carga térmica máxima de 2.778,9 kW na UAS, essa potência é inferior a outros sistemas já presentes na CNAAA, tais como o sistema de água gelada de Angra 1, que tem potência pouco acima de 3.800 kW, a qual é também dissipada para o ar ambiente.

O presente estudo numérico tem por objetivo quantificar qual seria a influência da UAS em termos do transporte da massa de ar quente até os pontos (i) a (iii) elencados acima. Conforme será detalhado na seção seguinte, este estudo emprega premissas conservadores, buscando considerar o cenário mais desfavorável no que se refere às condições que gerariam uma elevação na temperatura dos pontos (i) a (iii).

A seguir todas as hipóteses empregadas neste trabalho são descritas, seguidas dos resultados da simulação numérica e das conclusões finais.

2. METODOLOGIA E PREMISSAS UTILIZADAS

Para determinação dos campos de temperatura no entorno da UAS foi empregada uma abordagem bidimensional (2D), utilizando o software ANSYS Fluent®, que resolve as equações de movimento do fluido (ar ambiente) e de transporte de temperatura em regime permanente.

O domínio da simulação consiste num plano vertical posicionado na região indicada na Fig. 1, passando pela UAS, Centro de Informação (CI), Heliponto, BR-101 e chegando à encosta de Mata Atlântica. A Fig. 3 mostra esquematicamente a malha com os pontos de interesse.

A malha gerada para esse modelo é tridimensional, porém com a largura muito menor do que a altura e comprimento, conforme mostra a Fig. 2, de maneira que os efeitos na direção transversal ao escoamento principal são desprezíveis. O caráter bidimensional do modelo é complementado com condição de simetria nas faces laterais do domínio.

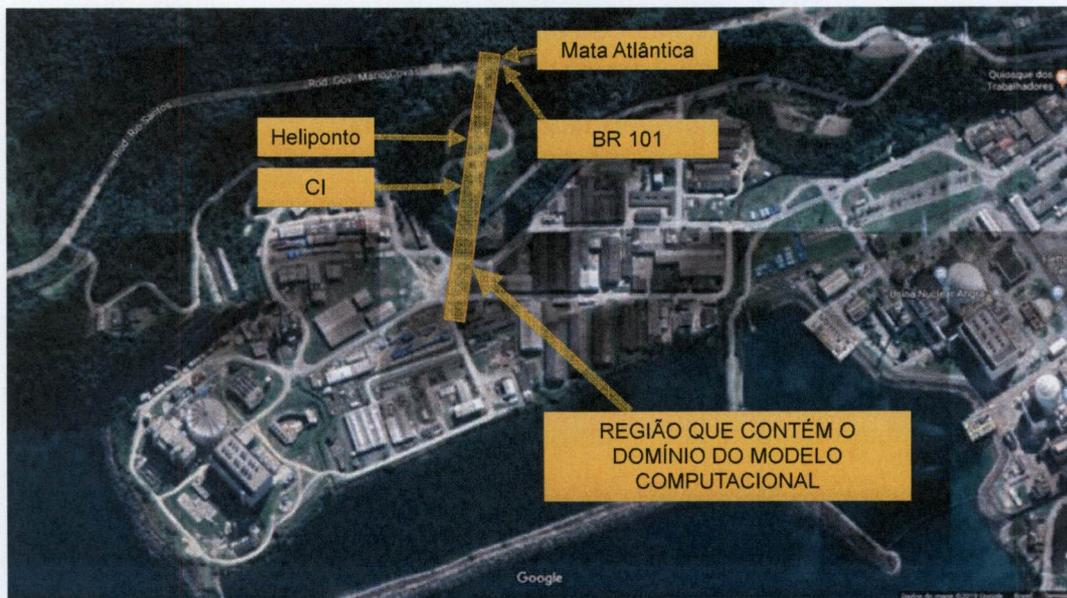


Fig. 1. Localização da malha computacional e dos pontos de interesse.

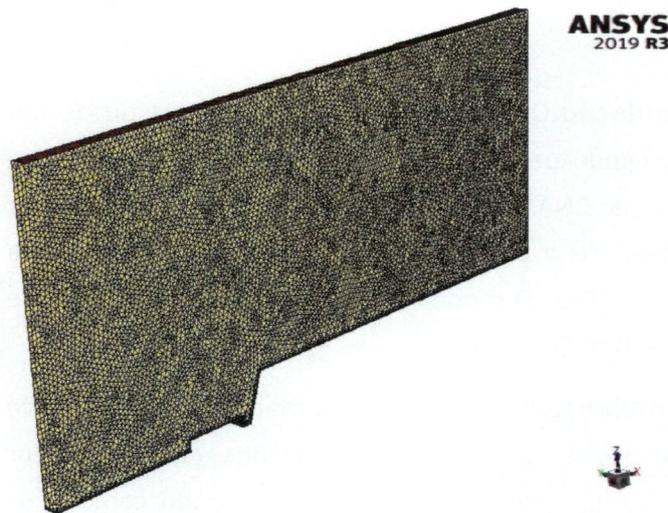


Fig. 2. Visão em perspectiva do domínio desenvolvido neste estudo, mostrando a relação entre as dimensões nas direções do escoamento e a dimensão transversal.

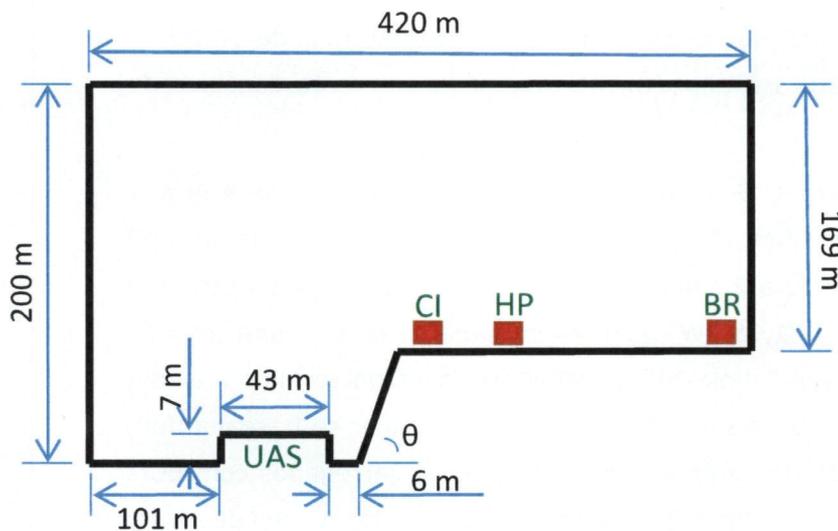


Fig. 3. dimensões do domínio da simulação; CI: Centro de Informações, HP: Heliponto, BR: BR101, MA: Mata Atlântica.

O estudo levou em conta uma faixa de velocidades de vento soprando da esquerda para a direita, variando de 0 a 5 m/s, tendo sido realizadas diversas simulações, uma para cada vento. Foi empregado o modelo de turbulência RNG κ - ϵ (*Re-Normalisation Group kappa-epsilon*), conforme recomendado no artigo científico /4/ para esse tipo de escoamento atmosférico sobre terreno, com possibilidade de separação de camada limite e formação de regiões de recirculação.

Além desses parâmetros, foram também adotadas as seguintes condições:

- **Domínio da simulação.** O domínio da simulação consistiu de um plano vertical passando pela UAS, o corte do talude, o Centro de Informacoes (CI) da CNAAA, o Heliporto e o trecho da BR-101 adjacente à CNAAA até o ponto onde começa a encosta de Mata Atlântica, junto à BR-101. O modelo utiliza uma altura de 200 m e comprimento de 420 m (Fig. 3).
- **Temperatura ambiente.** A temperatura tomada como referência no modelo foi de 36,56 °C, baseada no relatório /1/. Esse valor corresponde à máxima temperatura medida, tomando como base um conjunto de dados de temperatura medidos na região da UAS. Essa temperatura é usada como condição inicial para a simulação, de maneira que os acréscimos de temperatura gerados pela operação da UAS são calculados a partir do patamar de 36,56°C. Essa temperatura é também a temperatura do vento considerado no modelo.
- **Carga térmica.** UAS com 72 *overpacks*, sendo 30 de Angra 1 (modelo HI-STORM 37), carregados cada um com 37 ECIs de 0,99 kW, e 42 de Angra 2 (modelo HI-STORM 32), carregados cada um com 32 ECIs de 1,25 kW, resultando numa carga **térmica** total de 2778,9 kW (ver Tabela 1). Inicialmente, a carga térmica máxima estimada para a UAS era de 3330 kW. Esse valor se baseava num modelo padrão de *overpack* com 37 posições carregados com ECIs de Angra 2, i.e., com 1,25 kW de potência cada. À medida que o projeto avançou, mais detalhes foram definidos, estabelecendo, por exemplo, que o modelo de *overpack* para Angra 2 terá 32 posições (HI-STORM-32), sendo o HI-STORM-37 dedicado aos ECIs de Angra 1. Estes, no entanto, possuem carga térmica inferior aos de Angra 2, com potência máxima calculada em 0,99 kW após 10 anos de armazenamento na piscina. De maneira que a carga térmica utilizada para os cálculos foi composta a partir destas informações, em conjunto com a definição de que a UAS está sendo projetada para acomodar 30 *overpacks* de Angra 1 e 42 de Angra 2.

As condições inicial e de contorno utilizadas na simulação são:

- Condição inicial: temperatura de 36,56 °C
- Vento na entrada (da esquerda para a direita): constante, tendo sido utilizados diversos valores dentro do intervalo de 0 a 5 m/s
- Condição Neumann não homogênea (fluxo prescrito) no topo da região da UAS de 1.6156 kW/m² (2778,9 kW/40/43, considerando que a UAS ocupa uma área total de 40 m x 43 m)
- *Outflow* no lado direito e no topo
- Condição de não deslizamento nas regiões de parede
- Condição de simetria nas faces laterais

A malha tridimensional (Fig. 4) possui 293.233 elementos e 79.621 nós, com refinamento na região da UAS e demais regiões de parede (camada limite).

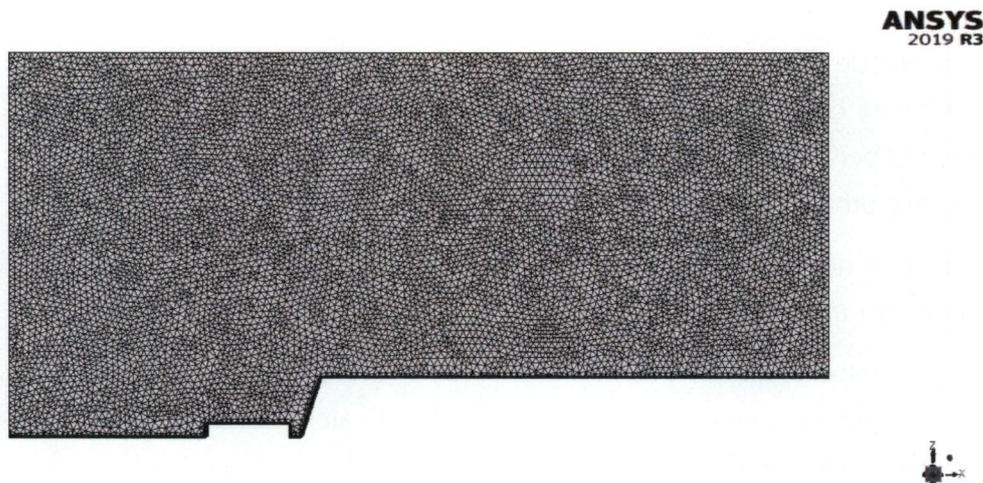


Fig. 4. malha computacional gerada para as simulações.

3. RESULTADOS

Foram realizadas diversas simulações, cada uma para uma condição de vento dentro da faixa 0 a 5 m/s. As simulações tinham por objetivo obter as soluções em regime permanente, dentro de critérios de convergência. Para algumas condições de vento, o código não foi capaz de convergir para uma solução estacionária, não sendo portanto consideradas no estudo.

A estratégia adotada para fornecer uma avaliação do impacto em toda a faixa de vento proposta foi ajustar uma curva (polinômio de grau 5) com base nos pontos em que o código chegou a uma solução estacionária.

A Fig. 5 mostra os resultados obtidos em termos do acréscimo de temperatura (ΔT) em relação à temperatura inicial de 36,56 °C, bem como os polinômios ajustados, para os três pontos de referência da presente avaliação – Centro de Informação (CI), heliporto (HP) e rodovia BR-101 (BR). É possível observar que para a maioria das condições de vento ocorre um decréscimo de ΔT no sentido do CI para a BR, o que é esperado, uma vez que pontos mais distantes da fonte de calor são normalmente menos impactados. Houve algumas condições, no entanto, em que esse gradiente se inverteu, o que é resultado das condições particulares do escoamento para aquela condição e também da alta complexidade do escoamento simulado. O número de Reynolds, um parâmetro adimensional que mede o quão turbulento é o escoamento, é da ordem de 10^7 – em geral, o escoamento já pode ser considerado turbulento a partir de Reynolds igual a 3000. O alto grau de turbulência indica uma natureza caótica do problema, o que explica essa inversão no acréscimo de temperatura em alguns casos, e explica também a não convergência para uma solução estacionária em certas condições.

De qualquer forma, na maioria dos casos o ΔT é maior no CI do que no HP, e neste também maior do que na BR.

Observa-se que velocidades de vento inferiores a 2 m/s produzem acréscimos de temperatura ligeiramente maiores até um valor máximo de $\Delta T = 1,2$ °C, em torno da condição de vento de 0,4 m/s. Para ventos mais baixos a convecção térmica domina o escoamento e o impacto torna a diminuir. Para ventos acima de 2 m/s, apesar de reduzir a participação da convecção natural, a mistura é maior, o que favorece a dissipação de calor.

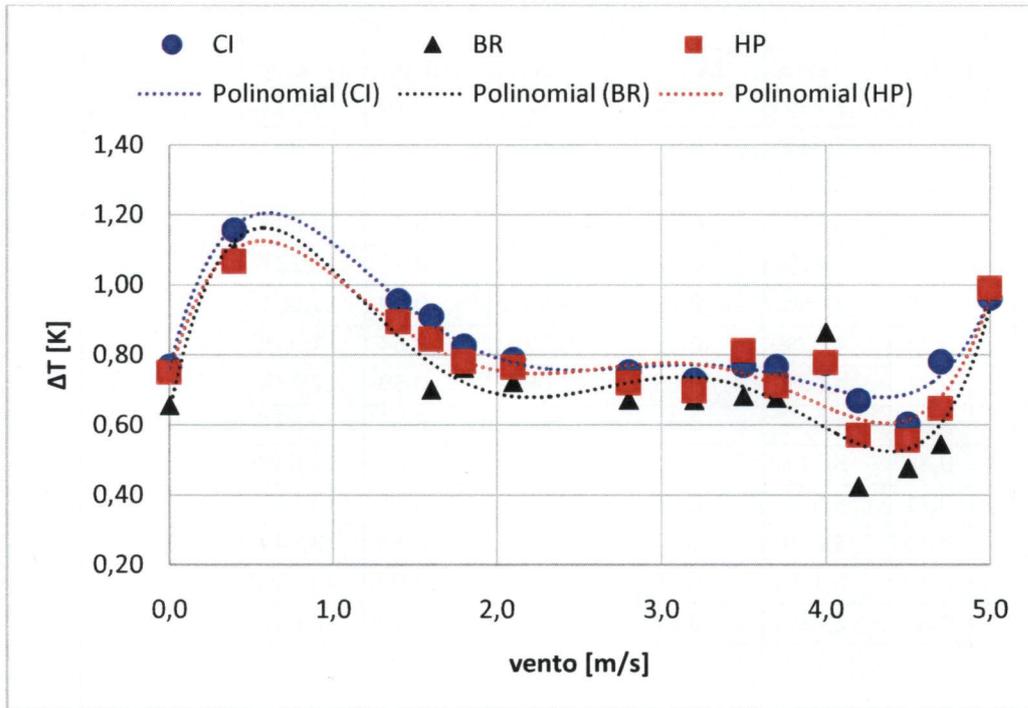


Fig. 5. Resultados das simulações.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com o auxílio dos polinômios ajustados aos resultados do modelo CFD.

Tabela 2. Acréscimo de temperatura nos pontos de interesse para a faixa de ventos variando de 0 a 5 m/s.

Vento [m/s]	CI		HP		BR	
	ΔT [K]	erro	ΔT [K]	erro	ΔT [K]	erro
0,0	0,76	0,09%	0,74	0,23%	0,64	1,47%
0,2	1,03	0,26%	0,98	0,72%	0,97	2,23%
0,4	1,17	0,44%	1,10	1,19%	1,13	2,96%
0,6	1,20	0,62%	1,12	1,65%	1,16	3,67%
0,8	1,18	0,81%	1,09	2,09%	1,12	4,36%
1,0	1,12	1,01%	1,03	2,52%	1,04	5,02%
1,2	1,04	1,21%	0,96	2,93%	0,95	5,66%
1,4	0,96	1,42%	0,88	3,33%	0,85	6,28%
1,6	0,89	1,63%	0,82	3,71%	0,78	6,88%
1,8	0,83	1,85%	0,78	4,07%	0,72	7,46%
2,0	0,79	2,08%	0,76	4,42%	0,69	8,01%
2,2	0,77	2,31%	0,75	4,76%	0,68	8,54%
2,4	0,76	2,55%	0,75	5,07%	0,69	9,04%

Cód O&M 042/04

Vento [m/s]	CI		HP		BR	
	ΔT [K]	erro	ΔT [K]	erro	ΔT [K]	erro
2,6	0,76	2,79%	0,76	5,38%	0,70	9,53%
2,8	0,76	3,04%	0,77	5,66%	0,72	9,99%
3,0	0,77	3,29%	0,78	5,93%	0,73	10,42%
3,2	0,77	3,55%	0,77	6,19%	0,74	10,84%
3,4	0,77	3,82%	0,76	6,43%	0,72	11,23%
3,6	0,75	4,09%	0,73	6,66%	0,69	11,60%
3,8	0,73	4,37%	0,69	6,87%	0,64	11,95%
4,0	0,71	4,66%	0,65	7,06%	0,59	12,27%
4,2	0,69	4,95%	0,62	7,24%	0,54	12,57%
4,4	0,68	5,24%	0,61	7,40%	0,52	12,85%
4,6	0,71	5,55%	0,64	7,55%	0,55	13,11%
4,8	0,79	5,85%	0,74	7,68%	0,68	13,34%
5,0	0,96	6,17%	0,96	7,80%	0,93	13,55%
média	0,86	2,83%	0,82	4,79%	0,78	8,65%

A Fig. 6 indica mais uma vez a localização dos pontos principais onde a temperatura foi avaliada e a Fig. 7 mostra as diferenças de temperatura nesses pontos numa visão de corte.

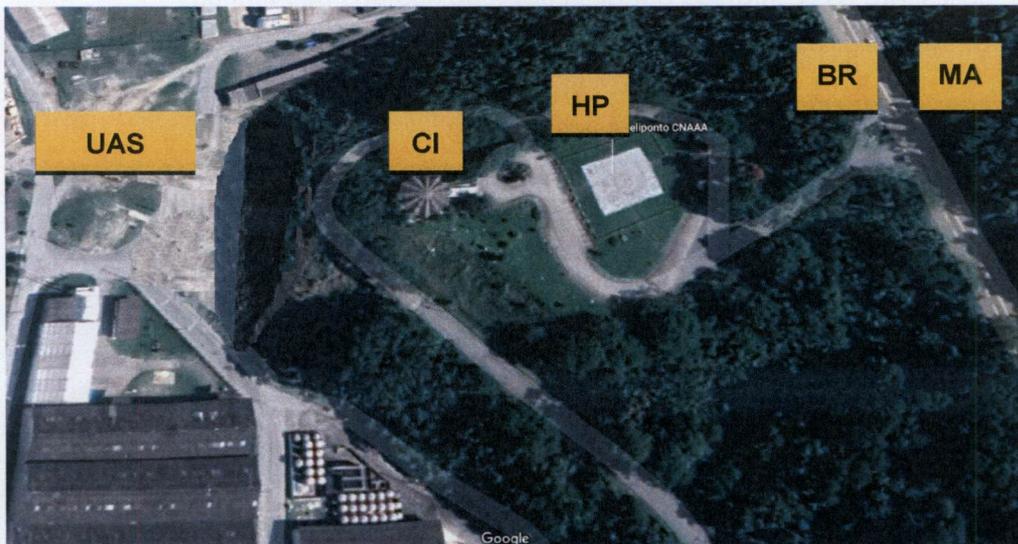


Fig. 6. Identificação dos pontos principais de temperatura incluindo: Centro de Informações (CI), Heliponto (HP), BR-101 (BR) e encostas de Mata Atlântica (MA).

Cód O&M 042/04



Fig. 7. Temperaturas máximas e diferenças máximas de temperatura de acordo com o modelo numérico para a condição de vento mais desfavorável.

As Fig. 8 a Fig. 11 mostram os campos de temperatura para quatro dos casos simulados – 0, 1,8 m/s, 3,5 m/s e 5 m/s. No caso sem vento, observa-se o efeito parede no escoamento, com a pluma térmica subindo aderida à parede do talude e depois buscando a região esquerda do domínio. Este é o caso em que ocorre apenas convecção térmica na dissipação do calor da UAS.

Nos demais casos observa-se um fluxo de ar quente sendo transportado na direção do CI, em função das condições impostas pelo modelo, com diferentes efeitos correspondentes às diferentes condições de vento.

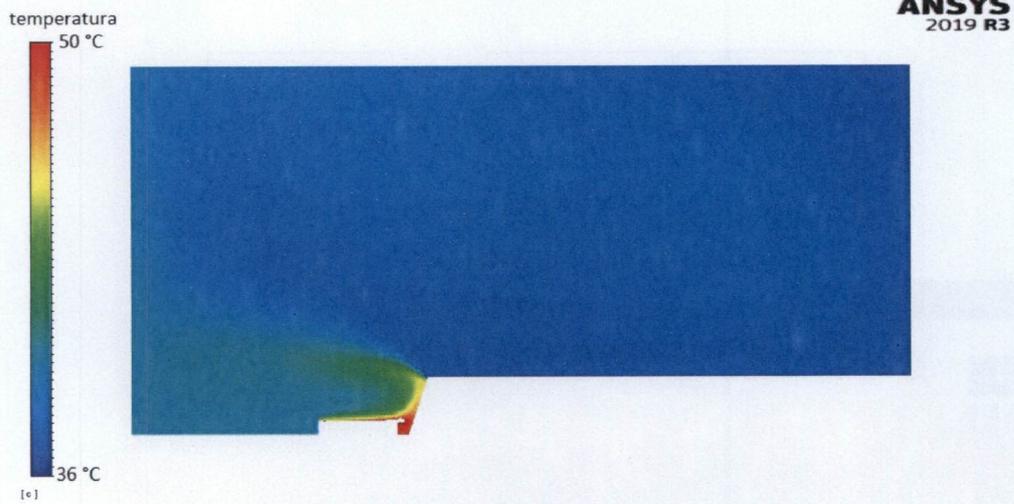


Fig. 8. Campo de temperatura para condição sem vento.

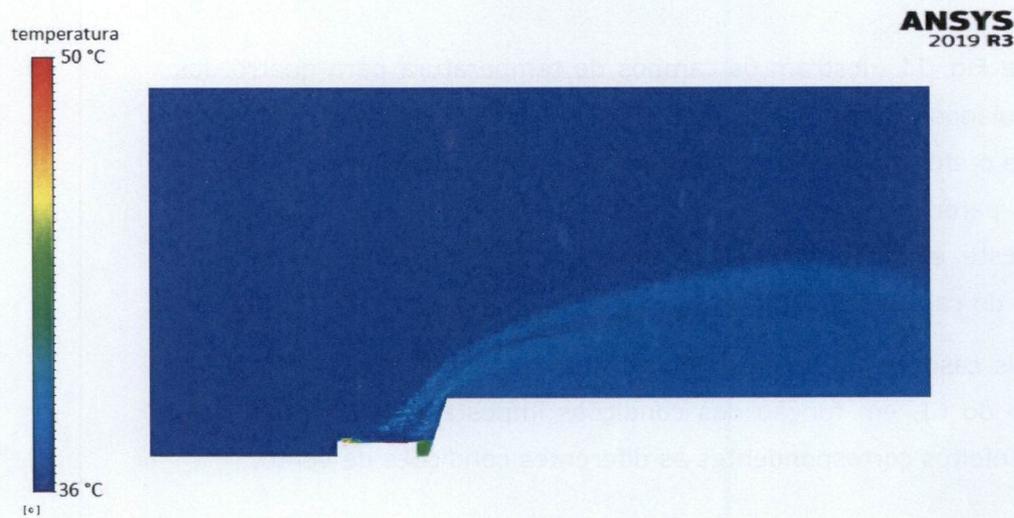


Fig. 9. Campo de temperatura para vento de 1,8 m/s.

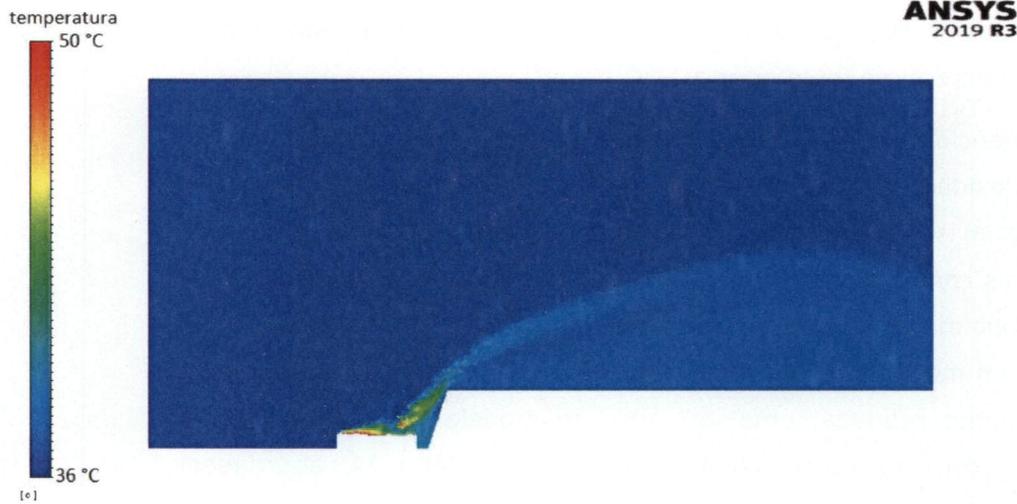


Fig. 10. Campo de temperatura para vento de 3,5 m/s.

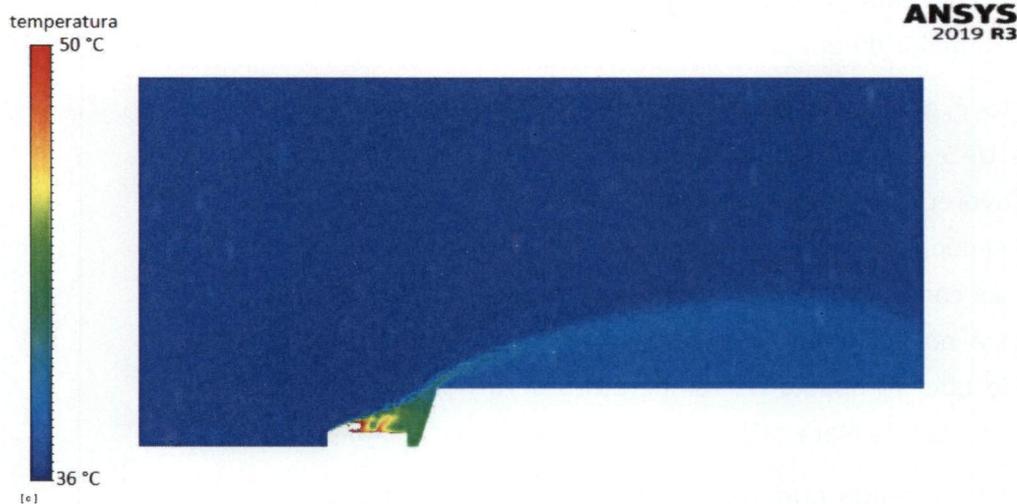


Fig. 11. Campo de temperatura para vento de 5,0 m/s.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos do modelo numérico mostram que, mesmo sendo adotadas premissas extremamente conservadoras, favoráveis para o aumento da temperatura na região, o acréscimo máximo de temperatura nos pontos considerados na modelagem computacional, i.e., (i) no Centro de Informações de Itaorna (Observatório Nuclear) (ii) no Heliporto e (iii) ao

Cód. O&M 042/04

longo do trecho da BR-101 adjacente à CNAAA, foi no máximo pouco maior do que 1 °C, no caso de vento igual a 0,4 m/s. Para outras condições o acréscimo foi inferior a 1 °C.

Como já mencionado, o fenômeno objeto do estudo aqui relatado possui alta complexidade, necessitando de diversas hipóteses simplificadoras que permitam sua modelagem computacional, o que é feito sempre no sentido mais conservador. A principal delas é a abordagem bidimensional de um problema essencialmente 3D. O objetivo da abordagem 2D foi dispor de um modelo viável capaz de fornecer respostas para uma malha suficientemente refinada, uma vez que um modelo 3D para a mesma aplicação teria um custo computacional muito alto. A abordagem bidimensional é conservadora uma vez que não considera os efeitos de dissipação de calor na direção ortogonal ao plano do modelo. É como se o calor ficasse confinado no plano de simulação. Na prática, a dissipação de calor é muito maior do que o que mostra a simulação.

Outro ponto é o fato de o modelo considerar o trecho entre o talude próximo à UAS e a BR-101 reto e sem obstruções². Essa simplificação também favorece o transporte de calor da UAS para os pontos de interesse, sendo, portanto, conservadora. Tendo em vista esse conjunto de premissas conservadoras, o baixo valor obtido da simulação numérica e a incerteza no valor numérico, a avaliação que se faz baseada neste estudo é de que o impacto na temperatura será nulo no trecho da BR-101, nas encostas de Mata Atlântica e adjacências.

É seguro afirmar ainda que, mesmo apontando acréscimos pequenos de temperatura nos pontos citados, o impacto da operação da UAS em sua capacidade máxima dificilmente atingirá os valores calculados, uma vez que não ocorre a condição de vento constante soprando numa única direção ao longo de várias horas (o que seria necessário para que esse aumento de temperatura fosse atingido).

Uma outra hipótese com larga margem de segurança é a carga térmica máxima da UAS estimada em 2.778 kW. Esse valor nunca será atingido uma vez que considera todos os elementos na condição de recém

² Seria inviável considerar um modelo com todos os detalhes presentes no domínio do estudo, como árvores, construções, variações de relevo etc.

transferidos de Angra 1 e Angra 2, quando na verdade, a cada campanha de transferência, os elementos anteriores já estarão num estágio muito mais reduzido de calor de decaimento, bem inferior aos 0,99 kW (Angra 1) e 1,25 kW (Angra 2) dos recém transferidos das piscinas.

Um outro ponto é que o preenchimento dos *overpacks* não é uniforme, ou seja, os elementos com máximo calor de decaimento terão 1,25 kW (no caso dos ECIs de Angra 2), mas nem todos ECIs contidos num mesmo *overpack* estarão nesta condição, por questões de equilíbrio radiológico, de maneira que as taxas máximas de 36,6 kW e 40 kW por *overpack* não serão atingidas nem para os primeiros módulos transferidos para a UAS (veja o exemplo da composição do *overpack* de Angra 2 na Fig. 12).

	1.0	1.0	1.0	1.0	
1.0	1.0	1.25	1.25	1.0	1.0
1.0	1.25	1.25	1.25	1.25	1.0
1.0	1.25	1.25	1.25	1.25	1.0
1.0	1.0	1.25	1.25	1.0	1.0
	1.0	1.0	1.0	1.0	

Fig. 12. Máxima carga térmica para HI-STORM-32 ML.

É possível concluir, portanto, a partir da análise dessas considerações, tomando como base os resultados das simulações numéricas, que a operação da UAS não acarretará em impacto térmico no Centro de Informação de Itaorna (Observatório Nuclear), Heliporto, trecho da BR-101 adjacente à CNAAA e encostas de mata atlântica.

Por fim, como já mencionado na introdução deste relatório, é relevante lembrar que a carga térmica dissipada pela UAS é igual à carga térmica

armazenada nas piscinas de elementos combustíveis das usinas, cujo calor é transferido para o mar. É importante, portanto, destacar que a UAS não vai gerar carga térmica nova para o ambiente, embora a fonte fria neste caso seja o ar (sem levar em conta quanto do calor transferido das piscinas para o mar é também absorvido pelo ar ambiente pela evaporação de água do mar, o que certamente ocorre). Em outras palavras, o presente estudo tem por objeto a dispersão de um calor já existente na CNAAA, que apenas será transferido para uma nova unidade de armazenamento.

Ou seja, no que se refere à operação da UAS, não haverá acréscimo de calor suficiente para causar alteração na região objeto do estudo descrito no presente relatório.

5. REFERÊNCIA

- /1/. BP-X-UFC-001117; 2015; Estudo da temperatura ambiente para o sistema de remoção de calor da Unidade UFC – R0
- /2/. BP-U-UAS-170007; 2017; Solução de Armazenamento Complementar para Elementos Combustíveis Irrradiados de Angra 1 e Angra 2 – R1
- /3/. GCN.T-031.11; 2011; Estimativa do Calor Residual em Função do Tempo de um EC Irradiado em Angra 1 até 50 MWd/kgU e em Angra 2 até 60 MWd/kgU – R0
- /4/. H. G. Kim and V. C. Patel; 2000; Test ofturbulencemodels for windflow over terrainwithseparationandrecirculation; Boundary-LayerMeteorology vol. 94:5-21; KluwerAcademicPublishers; Holanda.

