

Numerical study of the thermal performance of an outdoor cabinet for mobile telecommunications equipment.

Estudo numérico do desempenho térmico de um armário exterior para equipamentos de telecomunicações móveis.

Miguel Vicente Duarte - d1647@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva - dinho@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Luís Carlos Carvalho Pires - pires@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar - dinis@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Abstract

Outdoor cabinets that house telecommunication equipment are used to protect electronic equipment from the harsh environmental conditions. The number of outdoor cabinets used has been growing in recent decades, boosted by the world expansion of mobile telecommunications networks. The disposition of telecommunications equipment inside a cabinet (i.e., the thermal design) became a critical factor due to the miniaturization of electronic components and the increase of packing density. To mitigate this problem, energy-intensive cooling techniques (e.g., air conditioning) began to be used. Studies shown that approximately 25% of the total energy consumed in an outdoor cabinet is used for cooling. It is intended with this work, the thermal study of an outdoor cabinet using a CFD software to characterize its thermal behaviour, according to the influence of the environment temperature, the air flow through the cabinet and the heat dissipated in its interior by the telecommunications equipment. According the results obtained in this study it can be concluded that even for the less favourable case ($T_A=20.1\text{ }^\circ\text{C}$; $Q_{ar}=60\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ e $q_{dis}=480\text{ W}$), none of the telecommunications equipment inside the cabinet is under risk, since the $T_{max,cabinet} \approx 40\text{ }^\circ\text{C}$ is lower than the $T_{max,recommended} \approx 55\text{ }^\circ\text{C}$.

Resumo

Os armários exteriores que albergam equipamentos de telecomunicações protegem os equipamentos eletrónicos das condições ambientais adversas. O número de armários exteriores tem vindo a crescer nas últimas décadas, impulsionado pela expansão mundial das redes de telecomunicações móveis. A disposição dos equipamentos de telecomunicações no interior dos armários (i.e., o design térmico) tornou-se um fator crítico devido à miniaturização dos componentes eletrónicos e o aumento da densidade de empacotamento. Para mitigar este problema, técnicas de arrefecimento grandes consumidoras de energia começaram a ser utilizadas. Estudos mostraram que cerca de 25% da energia total consumida num armário exterior é utilizada para arrefecimento. Pretende-se com este trabalho, o estudo térmico de um armário exterior utilizando um software de CFD para caracterizar o seu comportamento térmico, tendo em conta a influência da temperatura do ar ambiente, do caudal de ar no armário e à potência térmica dissipada no seu interior pelos componentes de telecomunicações. De acordo dos resultados obtidos neste estudo pode concluir-se que mesmo para o caso menos favorável ($T_A=20.1\text{ }^\circ\text{C}$; $Q_{ar}=60\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ e $q_{dis}=480\text{ W}$), nenhum dos equipamentos de telecomunicações no interior do armário está em risco, uma vez que a $T_{max,armário} \approx 40\text{ }^\circ\text{C}$ é inferior à $T_{max,recomendada} \approx 55\text{ }^\circ\text{C}$.

Keywords

Outdoor cabinets, thermal design, numerical modeling and CFD.

Palavras-chave

Armários exteriores, design térmico, Modelação numérica e CFD.

Estudo numérico do desempenho térmico de um armário exterior para equipamentos de telecomunicações móveis

1. Introdução

Armários exteriores que albergam equipamentos de telecomunicações móveis têm como principal finalidade proteger os dispositivos eletrônicos das condições ambientais extremas (sol, humidade, salinidade, ruído, pó e detritos) e fatores humanos (vandalismo) [1]. Estes armários são bastante utilizados em aplicações de telecomunicações, industriais e militares, localizando-se maioritariamente em locais inóspitos. Na Holanda, das 5 mil estações BTS (Base Transceiver Stations) que estão a ser montadas para expansão da rede de telecomunicações móvel, 49% localizam-se no topo de edifícios (servindo de suporte a redes residenciais, industriais, escritórios, hospitais, hotéis, escolas, etc.), 29% em campo aberto e 22% noutros locais (incluindo o topo de antenas de telecomunicações) [2].

Em particular na indústria das telecomunicações móveis, o número de armários exteriores utilizados tem vindo a crescer bastante na última década, impulsionado pela expansão demográfica das redes sem fios (aumento de cobertura) em áreas urbanas e rurais [2,3]. Em 2007, na Itália, existiam mais de 60 mil RBS (Radio Base Stations), cujo consumo elétrico ultrapassara os 2 TWh por ano [4].

Desde a criação da rede de telecomunicações móveis em 1980, esta sofreu uma impressionante evolução tecnológica (Figura 1) e expansão, impulsionadas pela elevada aplicabilidade de serviços prestados [5]. De acordo com previsões da CISCO e do IEA, o crescimento da expansão da rede móvel durante as próximas décadas irá acentuar-se [5,6]:

- O tráfego mundial de dados móveis irá crescer 10 vezes em 5 anos (Figura 2);
- Regiões da Ásia, Médio Oriente e África apresentam o crescimento mais significativo;
- O número de dispositivos móveis conectados irá crescer dos 14 para 500 biliões entre 2013 e 2050;

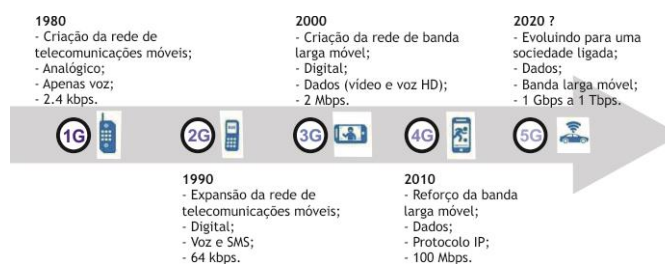


Figura 1 - Evolução da rede de telecomunicações móveis [5].

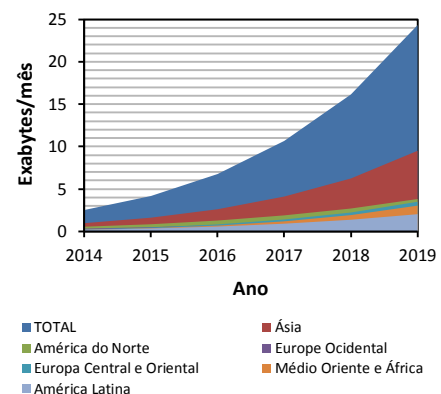


Figura 2 - Evolução do tráfego de dados móveis, por região no mundo [6].

A rede de telecomunicações móvel consome grandes quantidades de energia, resultando em elevados custos de operação para as empresas do setor. Por cada dispositivo conectados são em média consumidos 24.1 kWh e emitidos 13.7 kg de CO₂. Prevê-se que estes custos continuem a aumentar, se se mantiver o crescimento do preço da energia e a imposição da fiscalidade verde no ramo das telecomunicações (Mobile Green Manifesto publicado em 2012) [7].

O desenvolvimento tecnológico na área dos materiais semicondutores, impulsionado pela produção de equipamentos eletrónicos com elevadas capacidades de processamento (Figura 1), conduz a uma miniaturização dos componentes eletrónicos e aumento da densidade de empacotamento. Assiste-se a um aumento da quantidade de calor dissipado pelos componentes eletrónicos, tornando-se o seu design térmico um fator crítico [1].

Previsões da ASHRAE motram a evolução da potência térmica dissipada em equipamentos eletrónicos (Figura 3). Estima-se que esta potência tenha crescido 14 vezes (de 6.5 kW/m² em 1992 para 96.8 kW/m² em 2014) em dispositivos com extrema densidade [8].

O efeito adverso da temperatura em equipamentos eletrónicos foi já demonstrado num estudo (AVIP) realizado pela Força Aérea dos EUA. De acordo com este, mais de 55% das avarias em equipamentos eletrónicos devem-se à temperatura elevada [9]. Embora a temperatura máxima de operação para componentes eletrónicos seja especificada pelo fabricante, a norma internacional ETS 300 019-1-3 define o intervalo de -5 a 55 °C como a temperatura que garante a fiabilidade dos mesmos (caso das aplicações comerciais) [10].

Dada a elevada carga térmica dissipada no interior dos armários pelos equipamentos eletrónicos e a exposição às variantes climáticas ambientais desfavoráveis, torna-se necessário implementar estratégias eficientes para o controlo da temperatura no seu interior, por forma a aumentar a fiabilidade e durabilidade dos equipamentos de telecomunicações e reduzir o consumo energético associado ao arrefecimento [11].

Nos armários exteriores que servem de apoio a antenas de comunicação rádio, cerca de 25% da energia total consumida é utilizada para arrefecimento (Figura 4) [12]. Medições no terreno em armários exteriores que servem de apoio a redes GSM mostram que 1/3 da energia total consumida pela instalação é utilizada para arrefecimento e que existe um crescimento de 2.1 kWh/dia no consumo de energia por cada grau de diferença de temperatura entre a envolvente e o interior do armário, recorrendo a sistemas de ar condicionado [3].

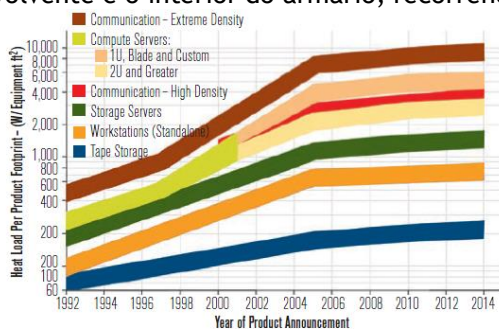


Figura 3 - Evolução da carga térmica dissipada em equipamentos eletrónicos [8].

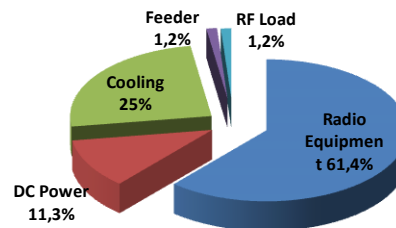


Figura 4 - Energia consumida por função numa RBS (Radio Base Station) [12].

A implementação de novas estratégias de arrefecimento ou melhorias nas estratégias atualmente utilizadas reduz significativamente o consumo energético da instalação. Na Tabela 1 são apresentados alguns importantes aspetos construtivos e de implementação relativos a armários exteriores [13]:

Tabela 1 - Aspetos construtivos e de implementação relativos aos armários exteriores.

Aspetos construtivos	Aspetos de implementação
Disposição dos equipamentos IT no interior do armário	Exposição solar
Re-direcionamento do fluxo de ar no interior do armário	Influência da temperatura exterior e poeiras
Custos inerentes ao sistema de arrefecimento (equipamentos e consumo energético)	Impacto visual do armário na envolvente
Ruído acústico dos ventiladores utilizados para o arrefecimento	
Facilidade de produção, montagem e manutenção	

As tecnologias atualmente mais utilizadas para o arrefecimento de armários exteriores são o sistema de ar condicionado e a convecção forçada. No entanto, a investigação tende para a aplicação de técnicas passivas. A aplicação destas técnicas apresenta como vantagens, um

menor consumo energético da instalação (baixos custos de operação) e o baixo impacto estético e acústico do armário [2,14,15].

Embora os armários exteriores sejam produzidos de acordo com normas estabelecidas na área, o design final do armário é da inteira responsabilidade do fabricante. Por isto, existem no mercado diversas configurações para armários exteriores. No seu interior os equipamentos dissipadores (equipamentos eletrónicos) são montados de forma aleatória, tornando-se assim importante o estudo térmico do interior do armário.

2. Importância da modelação numérica

Para o estudo térmico do interior do armário foi utilizado o software Fluent, presente no pacote comercial do software ANSYS. Trata-se de uma ferramenta CFD (Computational Fluid Dynamics) que aplica algoritmos avançados para a resolução das equações da conservação da massa, energia, momento e outras. Desta forma é possível prever o comportamento de um fluido em escoamento, transferências de calor, massa, entre outros.

Com o tempo a CFD tornou-se um elemento indispensável para o desenvolvimento, estudo e redesign de produtos e processos industriais, uma vez que [16]:

- Os resultados obtidos representam com grande exatidão a realidade;
- O aumento da velocidade de armazenamento e processamento computacional permitiram uma redução significativa do tempo de simulação e a análise de geometrias cada vez mais complexas;
- Os resultados são obtidos com maior rapidez e com um menor custo associado, comparativamente à experimentação.

Bastante utilizada em aplicações da indústria aeronáutica, refrigeração alimentar, química e petroquímica, apenas na última década a CFD ganhou relevância em aplicações envolvendo equipamentos eletrónicos. Isto refletiu-se na expansão do mercado relacionado com o design térmico de equipamentos eletrónicos. Em 2012 este mercado era avaliado em \$7 bilhões, esperando-se que atinja os \$10.1 bilhões em 2017 [14].

Na literatura podem ser encontrados diversos estudos onde é analisado o comportamento térmico de armários contendo no seu interior equipamentos eletrónicos. A principal temática dos estudos é potenciar a dissipação de calor por parte dos equipamentos eletrónicos, tendo em conta a disposição mais favorável dos componentes eletrónicos no interior do armário e estudar a utilização de sistemas de arrefecimento.

Dos estudos encontrados, destaque para a utilização de diferentes softwares de CFD: Flotherm [2,13,17,18]; Fluent [19] e Icepak [1] (os dois últimos, ambos da ANSYS).

3. Descrição do armário exterior

O ABE (Armário Base Exterior) começou a ser instalado em 2011 por uma importante empresa portuguesa da área das telecomunicações. Este é totalmente construído em material Aluzinc, apresentando 638 mm (L) × 1,480 mm (A) × 644 mm (P) de dimensões exteriores e 25U (unidade da rack, 1U=44.45mm) de espaço interior para fixação dos equipamentos de telecomunicações.

Pintado de cor branca com o intuito de refletir o máximo de luz solar incidente é constituído por um chão falso, paredes laterais duplas, filtro de ar G4 nas três entradas de ar laterais para a rack, 2 ventiladores no acesso ao ‘chapéu’, saídas de ar laterais no ‘chapéu’ abrigadas da chuva, a rack, as cablagens e os quadros AC e DC (Figura 5 e Figura 6).

As paredes laterais duplas servem de ponte entre as entradas de ar exterior e as entradas de ar para a rack. Antes de entrar para a rack, o ar proveniente da parede dupla é filtrado. Assim sendo, a entrada de ar para a rack é feita na parte inferior das laterais e é devolvido ao ambiente na parte superior (chapéu).

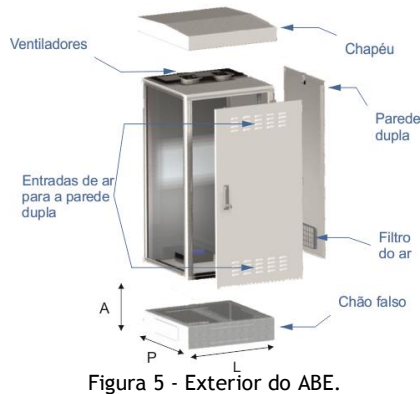


Figura 5 - Exterior do ABE.

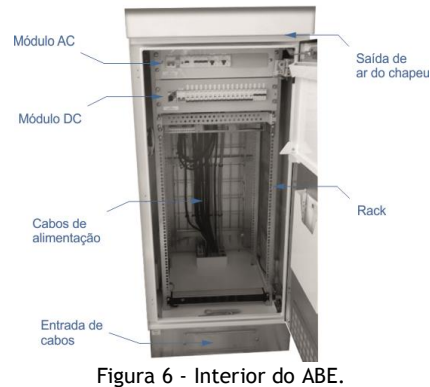


Figura 6 - Interior do ABE.

De acordo com o fabricante, o ABE deve ser capaz de manter uma temperatura interior entre os -5 e 50 °C apenas com convecção natural para uma potência térmica de 250W dissipada no seu interior. Porém, possui 2 ventiladores e a possibilidade de instalação de um ar condicionado de forma a ser possível aumentar a capacidade de dissipação de calor.

Os ventiladores são do tipo axial, alimentados a DC com uma potência nominal de 5.1 W e um caudal máximo de $170 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Estes encontram-se montados entre a rack e o chapéu.

Na parte superior do armário (junto aos quadros AC/DC) existe um sensor que monitoriza a temperatura do interior do armário, sendo que quando esta ultrapassa os 35°C os ventiladores são acionados.

4. Descrição do modelo numérico

Como foi referido anteriormente, o Fluent foi o software de CFD escolhido para simular o interior do armário. Procedeu-se agora à descrição detalhada do modelo construído e das condições impostas para a simulação.

Foi construída uma geometria 3D (Figura 9) e a simulação realizada para regime permanente. A malha computacional criada é do tipo tetraédrica não estruturada, tendo sido realizado o refinamento da malha em locais específicos (ex.: na zona dos componentes de telecomunicações).

O modelo de turbulência utilizado foi o k- ϵ . Em termos de materiais, o ar e o alumínio foram os escolhidos. O efeito da gravidade foi também contabilizado ($g = 9.81 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$). Foi ainda aplicado o modelo de Boussinesq ao elemento fluido (ar) para melhorar a convergência do sistema, de forma a colmatar as flutuações introduzidas pela variação local da densidade do fluido com o gradiente de temperatura.

4.1 Parâmetros em estudo

O comportamento do armário foi estudado tendo em conta os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar exterior (ambiente) - T_A [°C];
- Caudal de ar no armário - Q_{ar} [m^3h^{-1}];
- Potência térmica dissipada pelos equipamentos de telecomunicações - q_{dis} [W].

Com o intuito de perceber a resposta deste género de armário exterior quando sujeito a condições ambientais reais, seleccionou-se um elemento que se encontra instalado junto à localidade do Tortosendo, Covilhã. Este armário exterior serve de apoio à rede de telecomunicações da auto-estrada A23.

Foi escolhido um intervalo de tempo para a análise em conjunto com o pretendido pela empresa. Neste caso, o estudo foi realizado para condições ambientais extremas, sentidas entre 14 e 19 de Abril, nomeadamente: valores de temperatura exterior máxima, mínima e

média e carga solar média diária. Os dados climáticos foram obtidos através da base de dados que acompanha o software computacional DesignBuilder (Figura 7).

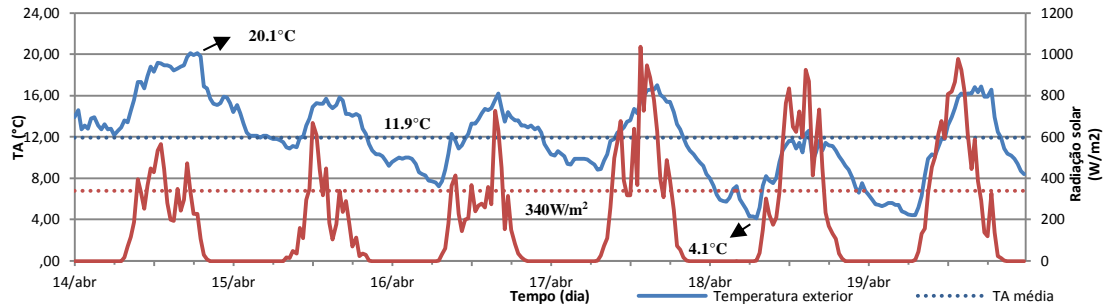


Figura 7 - Variação da temperatura exterior e radiação solar incidente durante o período escolhido para o estudo, na Covilhã.

O caudal de ar que circula pelo armário foi medido em laboratório com recurso a um anemómetro, sendo este $100 \text{ [m}^3\text{h}^{-1}\text{]}$.

A disposição dos equipamentos de telecomunicações estudada representa a encontrada no armário indicado pela empresa (Figura 8). Todos os equipamentos de telecomunicações possuem ventilação própria, sendo a direção do escoamento da direita para a esquerda. Na Tabela 2 são apresentadas as características dos diferentes equipamentos de telecomunicações. Para o estudo, considerou-se que os equipamentos de telecomunicações podem operar à carga máxima, a $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ da carga máxima.

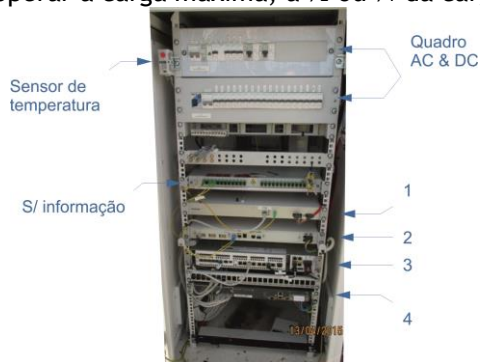


Figura 8 - Distribuição dos equipamentos de telecomunicações.

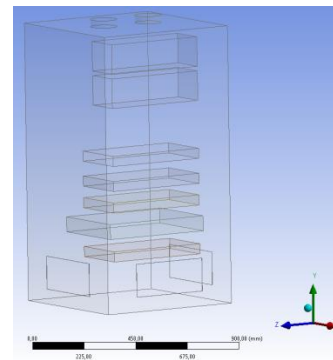


Figura 9 - Geometria criada.

Tabela 2 - Características dos equipamentos de telecomunicações.

Equipamentos de telecomunicações	Potência térmica dissipada [W]			Circulação de ar interna [m^3h^{-1}]
	Máxima	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	
1	60	30	15	25
2	60	30	15	25
3	300	150	75	40
4	60	30	15	25
Total	480	240	120	

Por forma a facilitar a modelação do espaço da rack foram efetuadas algumas simplificações na geometria criada em relação ao equipamento real. Foram para isso desprezadas as regiões do chão falso, chapéu e a parede dupla (Figura 9). Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros assumidos para os casos estudados.

Tabela 3 - Tabela de resumo com as condições de teste.

Casos		T_A [°C]	Q_{ar} [m^3h^{-1}]	q_{dis} [W]
ΔT_A	1	4.1		
	2	11.9	100	480
	3	20.1		
ΔQ_{ar}	4		60	
	5	20.1	80	480

	6 (=3)		100	
ΔQ_{dis}	7			120
	8	20.1	100	240
	9 (=3)			480

4.2 Condições de fronteira

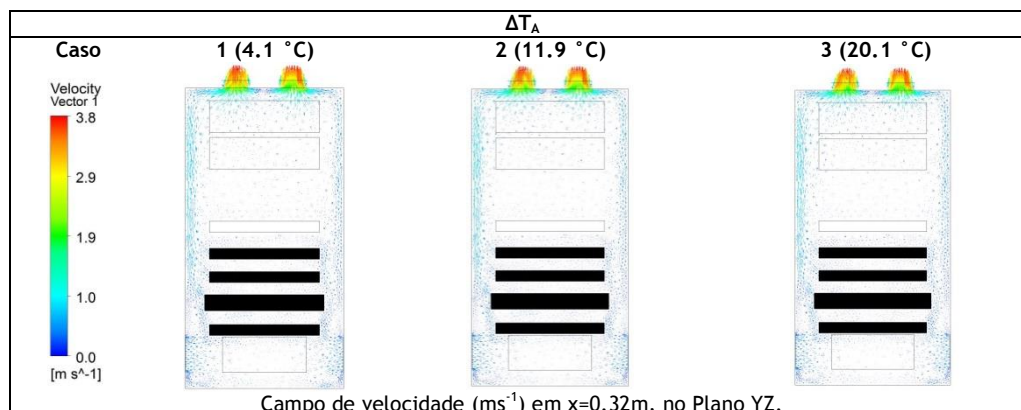
As condições de fronteira definidas no modelo numérico tiveram por base diferentes tipos de dados: dados experimentais recolhidos em laboratório; dados recolhidos dos datasheet dos equipamentos e dados provenientes de bases de dados climatéricas. Na Tabela 4 encontram-se os diferentes tipos de condições utilizados nas simulações.

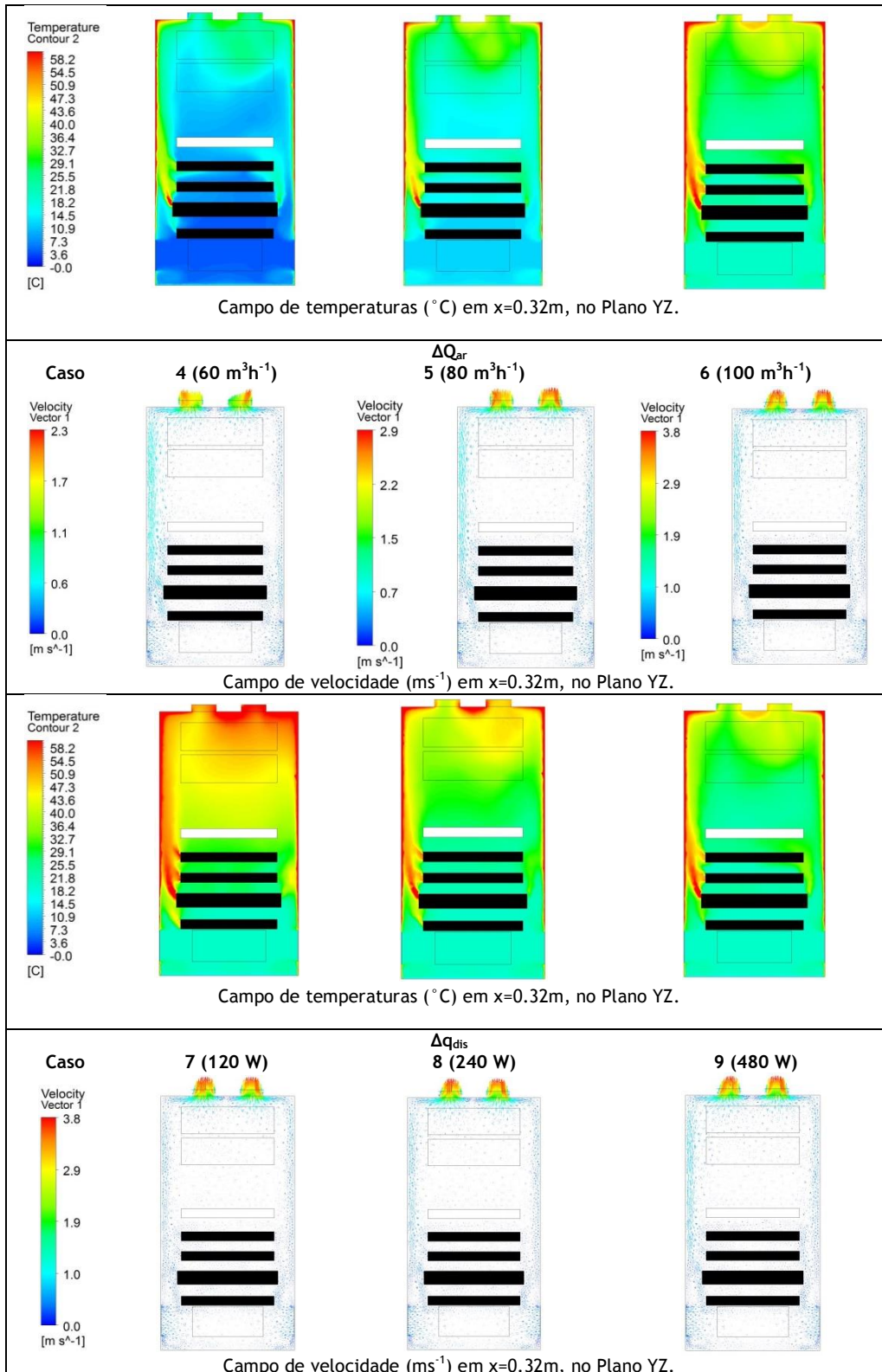
Tabela 4 - Diferentes tipos de condições de fronteira impostas nas simulações.

Cargas Térmicas			
Superfície		Valor	Unidades
Paredes laterais		340	Wm^{-2}
Equipamento 1		59/118/236	Wm^{-2}
Equipamento 2		59/118/236	Wm^{-2}
Equipamento 3		187/373/746	Wm^{-2}
Equipamento 4		59/118/236	Wm^{-2}
Piso		15	$^{\circ}C$
Velocity-inlet/Pressure outlet			
Superfície		Valor	Unidades
Entradas de ar	Velocidade	0.22/0.3/0.38	ms^{-1}
	Intensidade de turbulência	5%	
	Diâmetro hidráulico	0,406	m
	Temperatura	4.1/11.9/20.1	$^{\circ}C$
Saídas de ar	Pressão relativa	0	Pa
	Intensidade de turbulência	5%	
	Diâmetro hidráulico	0,232	m
	Temperatura	4.1/11.9/20.1	$^{\circ}C$

5. Análise e discussão de resultados

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da simulação computacional. O plano escolhido para a apresentação dos resultados corresponde a um corte no centro do armário, com vista frontal (em $x=0.32m$, no Plano YZ). Na Figura 10 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes casos no Plano acima mencionado.





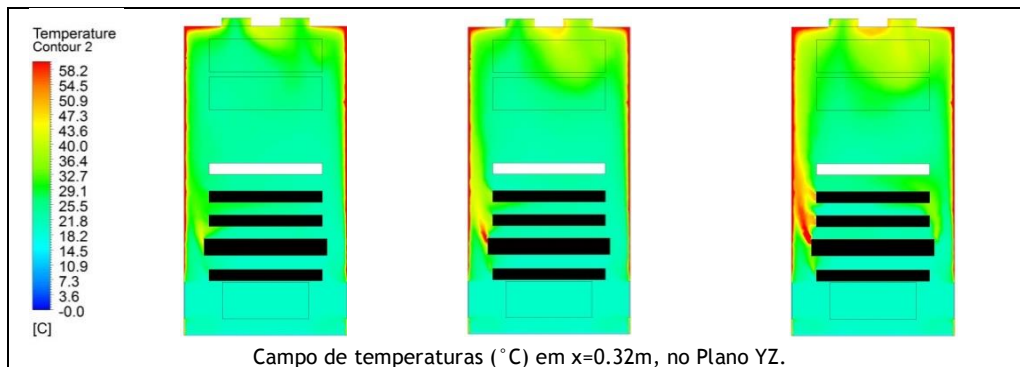


Figura 10 - Resultados obtidos para o campo de velocidade e temperatura em x=0.32, no Plano YZ.

Da análise dos resultados obtidos na simulação computacional, sabe-se que:

- A variação do caudal de ar afeta significativamente a capacidade em retirar calor do interior do armário;
- O campo de velocidades não parece ser afetado pela variação das condições testadas;
- Mesmo o caso mais desfavorável (4) não colocaria em risco os equipamento de telecomunicações ($T_{sup}=40^{\circ}\text{C} < 55^{\circ}\text{C}$).

6. Conclusão

O armário exterior de telecomunicações móveis tem vindo a ganhar importância devido à expansão da rede móvel mundial. A disposição dos equipamentos de telecomunicações tornou-se um fator crítico devido ao aumento da potência térmica dissipada pelos mesmos. Passando assim a ser necessário utilizar sistemas de arrefecimento ativos, grandes consumidores de energia. Isto torna os estudos desta índole importantes. Neste caso foi estudado um armário exterior localizado perto da Covilhã. Tendo em conta as condições definidas para o estudo, pode afirmar-se que nenhum equipamento de telecomunicações instalado no interior do armário se encontra em risco.

Bibliography

[1] Wankhede, M.; Khaire, V.; Goswami, A.; Mahajan, S.D. Evaluation of cooling solutions for outdoor electronics. *Proceedings of 9th Electronic Packaging Technology Conference (EPTC)*, Singapore, Dec 2007.

[2] Kaptein, R.; Luo, S.; Wei, Q. ; Wang, O. Smart Management of LTE Outdoor Site Support Cabinet- Migrate Towards Simplicity. *Proceedings of 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, Canada, Sep-Oct 2014.

[3] Lubritto, C.; Petraglia, A.; Vetromile, C.; Curcuruto, S.; Logorelli, M.; Marsico, G.; D’Onofrio, A.: “Energy and environmental aspects of mobile communication systems”. *Energy*, Vol. 36 (2011), doi:10.1016/j.energy.2010.11.039, pp. 1109-1114.

[4] Lubritto, C.; Petraglia, A.; Vetromile, C.; Caterina, F.; D’Onofrio, A.; Logorelli, M.; Marsico, G.; Curcuruto, S. Telecommunication power systems: Energy saving, renewable sources and environmental monitoring. *Proceedings of 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, San Diego, United States, Sep 2008.

- [5] Ericsson. *Ericsson Mobile Report*. <http://www.ericsson.com/res/docs/2014/ericsson-mobility-report-november-2014.pdf> (31/07/2015).
- [6] Cisco. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014-2019 White Paper*.
http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html (31/07/2015).
- [7] Le Masson, S.; Chehade, A. A.; Louahli-gualous, H. Passive cooling of telecommunication outdoor cabinets for mobile base station. *Proceedings of 35th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Hamburg, Germany, Oct 2013.
- [8] Beaty, D. L.: "IT Equipment Load Trends". *ASHRAE Journal*, Part One (2014), pp. 74-80.
- [9] Reynell, M.: "Advanced thermal analysis of packaged electronic systems using computational fluid dynamics techniques". *Computer-Aided Engineering Journal*, Vol. 7 (1990), ISSN: 0263-9327, pp. 104-106.
- [10] ETSI. *European Standard: ETSI EN 300 019-1-3*.
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300001_300099/3000190103/02.03.02_60/en_3000190103v020302p.pdf (31/07/2015).
- [11] Alawadhi, E. M.; Amon, C. H.: "PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies". *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 26 (2003), ISSN: 1521-3331, pp. 116-125.
- [12] Roy, S. (Emerson) *Energy Logic for Telecommunications*.
http://book.itep.ru/depository/power_consumption/energy_logic_for_telecom_white_paper.pdf (31/07/2015).
- [13] Muralidharan, B.; Iqbal Mariam, F. A.; Karajgikar, S.; Agonafer, D.; Hendrix, M. Energy minimization based fan configuration for double walled telecommunication cabinet with solar load. *Proceedings of 26th SEMI-THERM 2010*, Santa Clara, United States, Feb 2010.
- [14] Ahmadi, M.; Gholami, A.; Lau, K. Passive Cooling of Outside Plant Power Systems , a Green Solution to Reduce Energy Consumption. *Proceedings of 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, Canada, Sep-Oct 2014.
- [15] Sisk, L.; Allen, D. Energy Efficient Cooling Strategies for Telecom. *Proceedings of 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, Canada, Sep-Oct 2014.
- [16] Smale, N.J.; Moureh, J.; Cortella, G.: "A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29 (2006), doi:10.1016/j.ijrefrig.2006.03.019, pp. 911-930.
- [17] Boukhanouf, R.; Haddad, A.: "A CFD analysis of an electronics cooling enclosure for application in telecommunication systems". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30 (2010), doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.06.012, pp. 2426-2434.
- [18] Mariam, F. A. I.; Raju, U.; Mulay, V.; Agonafer, D.; Sivanandan, D.; Hendrix, M. Thermal design considerations of air-cooled high powered telecommunication cabinets. *Proceedings of 25th SEMI-THERM 2009*, San Jose, United States, March 2009.
- [19] Radhakrishnan, T. V.; Balaji, C.; Venkateshan, S.P.: "Optimization of multiple heaters in a vented enclosure - A combined numerical and experimental study". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49 (2010), doi:10.1016/j.ijthermalsci.2009.09.012, pp. 721-732.