UTILIZAÇÃO DE COMPUTAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO EM PROBLEMAS INDUSTRIAIS COMPLEXOS

J. F. Caseiro*, P. Alberto **
* Centro Tecnológico da Indústria dos Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos (CENTIMFE)
** Laboratório de Computação Avançada – Universidade de Coimbra

INTRODUÇÃO

Com a evolução da motorização dos veículos automóveis, e em particular no caso dos motores elétricos, os ruídos relacionados com o funcionamento do motor foram reduzidos de forma significativa. Consequentemente, fontes de ruído anteriormente classificadas como menores, apresentam agora uma relevância acrescida. Em particular, o sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) têm um impacto significativo na perceção de conforto dos utilizadores.

Utilizando a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD do inglês *Computacional Fluid Dynamics*), é analisado o ruído devido ao escoamento do ar e efeitos de turbulência com recurso a um modelo aero-acústico. No entanto, este modelo requer o uso de formulações como o *Detached-Eddy Simulation* (DES), malhas com elevado grau de refinamento e incrementos de tempo reduzidos. Todos estes fatores resultam em modelos numéricos complexos que necessitam de várias semanas de execução. Por essa razão, é pretendido com este estudo demonstrar as vantagens da utilização de recursos de Computação de Alto Desempenho (HPC, do inglês *High-Performance Computing*) para a resolução de problemas industriais complexos. Para tal é utilizado o HPC Cluster Navigator do Centro de Computação Avançada (LCA) da Universidade de Coimbra.

Este trabalho foi realizado no âmbito do SHAPE (SME HPC *Adoption Programme in Europe*), uma iniciativa europeia com o apoio do projeto PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*) que pretende demonstrar às Pequenas e Médias Empresas (PME) as vantagens da utilização de HPC.

DESCRIÇÃO DO MODELO

A geometria analisada corresponde a uma conduta de um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) de um automóvel. A geometria, representada na Figura 1, é composta por uma conduta e dois conjuntos de lamelas que são utilizadas para direcionar o

GUIAMENTO ADEQUADO PARA CADA MOLDE

KNARR®

517404

CASQUILHO DE ESFERAS „FREELUB"

- Dupla fileira de esferas para suportar até mais 25 % de carga
- Movimento das esferas assegurado por lubrificantes sólidos

281010 282510

BARRAS DE DESLIZE

- Disponível com revestimento DLC ou autolubrificante
- Vários comprimentos e formas

282540 281040

ATÉ 398 MM DE COMPRIMENTO

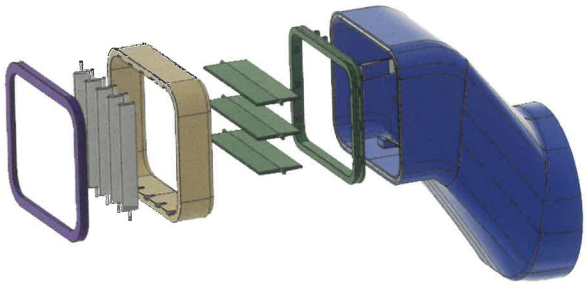
ENTREGA NO DIA SEGUINTE
Se fizer a encomenda antes das 14 h esta será enviada no mesmo dia e entregue sempre no dia útil seguinte.
Pode recolher uma encomenda diretamente no nosso armazém no seguinte horário: 8 h 30-12 h 00 / 13 h 00-17 h 30

MORADA
ARMAZÉM IBÉRICO
Rua da Sismaria, Lote 21, nº 253B
Parque Industrial Cova das Faias
Marrazes, 2415-809 Leiria • PORTUGAL

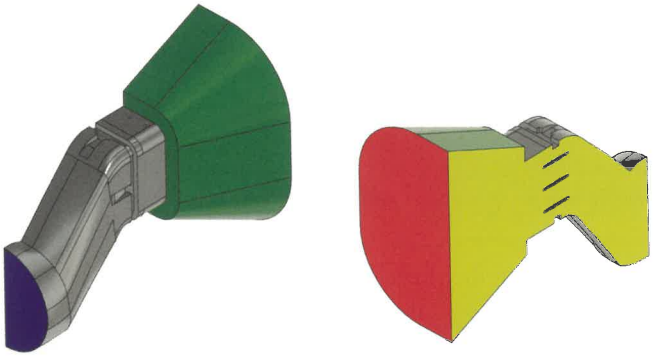
O seu parceiro ideal para a fabricação de moldes e ferramentas.

Tel. 00351 244 205 150 • sales.pt@knarr.com • KNARR.com

fluxo de ar. Portanto, o modelo numérico corresponde ao interior do ventilador e a uma porção do habitáculo dos passageiros (Figura 2). De forma a reduzir o custo computacional, foram consideradas condições de simetria. O fluxo do ar à entrada foi definido como 400m3/h. A simulação numérica foi realizada utilizando o *software* Ansys® Fluent.



/ / Figura 1 – Geometria do ventilador.



/ / Figura 2 – Interior do ventilador com entrada (azul) e saída (vermelho) de ar e condições de simetria (amarelo).

Foi também criado um protótipo físico da geometria com recurso à tecnologia de fabrico aditivo SLS. Os diversos componentes foram polidos e pintados de forma a obter um acabamento superficial equivalente ao que seria obtido através do processo de moldação por injeção. O protótipo foi, posteriormente, utilizado para obtenção de dados experimentais para validação do modelo numérico.

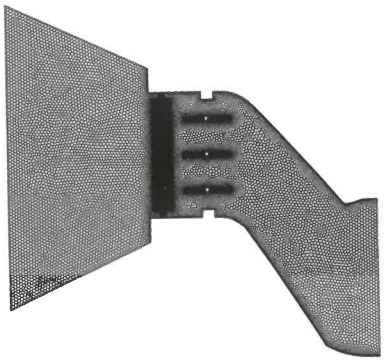
DESEMPENHO DO NAVIGATOR E WORKSTATION

A primeira etapa do estudo consiste em comparar os desempenhos de uma *workstation* disponível no CENTIMFE e no Cluster Navigator do Laboratório de Computação Avançada da Universidade de Coimbra.

A *workstation* do CENTIMFE é composta por um Intel Xeon Gold 6128 CPU @ 3.4GHz com 64GB de RAM. Devido a limitações do *software*, apenas podem ser utilizados 4 cores para a simulação.

Já o Cluster Navigator encontra-se dividido em dois módulos. O primeiro módulo contém 164 nós com 2 x Intel Xeon E5-2697v2 (12-core) @ 2.70 GHz e 96 GB de memória, num total de 3936 *cores*. O módulo mais recente, e que é utilizado neste estudo, é constituído por 28 nós, em que cada nó é constituído por 2x Intel Xeon Gold 6148 (20-cores) @ 2.40 GHz e 96GB de memória, perfazendo um total de 1280 *cores* disponíveis. Devido a restrições na licença do *software* utilizado, o número máximo de *cores* disponíveis para a simulação é de 64.

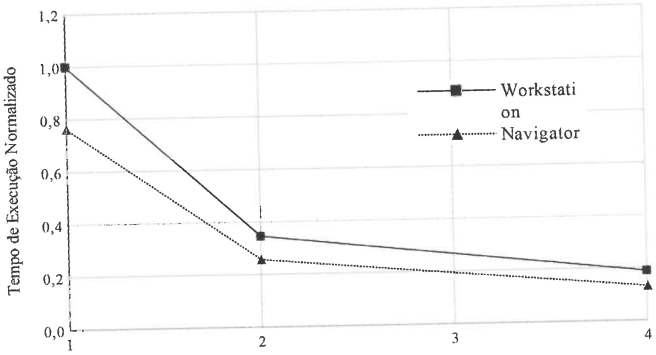
Em relação ao modelo numérico, os efeitos de turbulência são descritos pelo modelo *k-epsilon* com *Scalable Wall Functions*. O acoplamento pressão-velocidade é realizado através do esquema SIMPLE. A malha é composta por 1.7 milhões de células. Uma vez que se trata de um modelo 3D, um total de seis equações (uma para pressão, três para as velocidades segundo os eixos x, y e z e duas para descrição da turbulência) são resolvidas para cada célula em cada iteração. A malha considerada é apresentada na Figura 3.



/ / Figura 3 – Discretização do modelo considerando 1.7 milhões de células.

O processo de simulação encontra-se dividido em três etapas: i) leitura do ficheiro contendo toda a informação acerca do problema (malha, condições fronteira, modelos, etc.), ii) processo iterativo até obtenção de convergência e iii) escrita dos resultados para ficheiro de *output*. O ficheiro de entrada é previamente gerado na *workstation* e carregado para o Navigator.

Na Figura 4, o tempo de execução para a *workstation* e para o Cluster Navigator é apresentado. Para facilitar a comparação, o tempo de execução é normalizado através do tempo de execução da *workstation* com 1 *core*. É possível observar que o desempenho do Navigator é superior ao da *workstation*, sendo obtida uma redução de tempo de execução de cerca de 6% utilizando 4 *cores*.



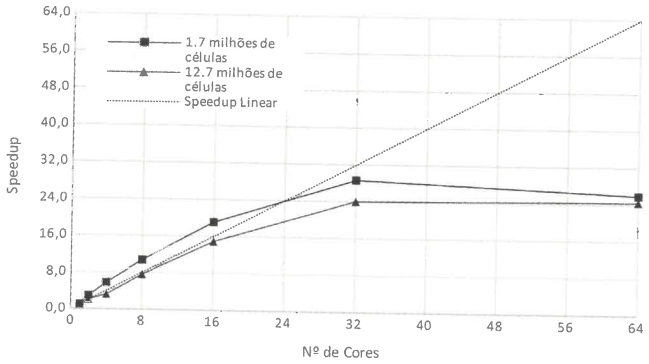
/ / Figure 4 – Tempo de execução normalizado para a workstation e Navigator Cluster.

Seguidamente, é analisado o desempenho do *cluster* considerando diferentes configurações de parâmetros, bem como para problemas de tamanhos diferentes. Com esse intuito, a aceleração (*speedup*) do processo é dada através de $S(p) = \frac{t(1)}{t(p)}$,

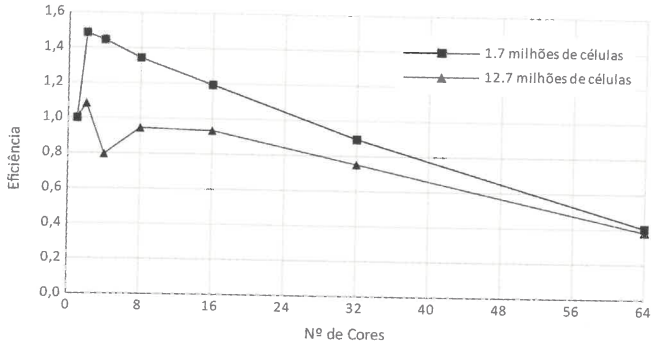
em que t(1) é o tempo de execução considerando uma unidade de processamento e t(p) o tempo de execução com p unidades de processamento. Adicionalmente, a eficiência pode ser definida como $E(p) = \frac{S(p)}{p} = \frac{t(1)}{p \times t(p)}$.

Primeiramente, o desempenho do Navigator é comparado para diferentes densidades de malha (1.7 e 12.7 milhões de células), utilizando apenas um nó para computação. Os resultados são apresentados na Figura 5 e Figura 6.

Como se pode observar, o comportamento para ambos os casos é similar, mas a curva correspondente à malha mais densa apresenta um desfasamento vertical. Por outro lado, é possível observar que, na transição de um para dois *cores*, existe um aumento da eficiência para valores acima dos 100%. Este comportamento é definido como *superlinear* speedup e ocorre quando o total de trabalho realizado por múltiplas unidades de processamento é inferior ao trabalho total realizado por uma única unidade de processamento. No entanto, quando são utilizados dois ou mais *cores*, a eficiência decresce progressivamente com o aumento do número de *cores*. É também possível observar que, para o caso de 64 *cores*, o *speedup* obtido é inferior ao correspondente a 32 *cores*. Isto indica que poderão existir ganhos considerando outras distribuições de trabalho pelas unidades de processamento.

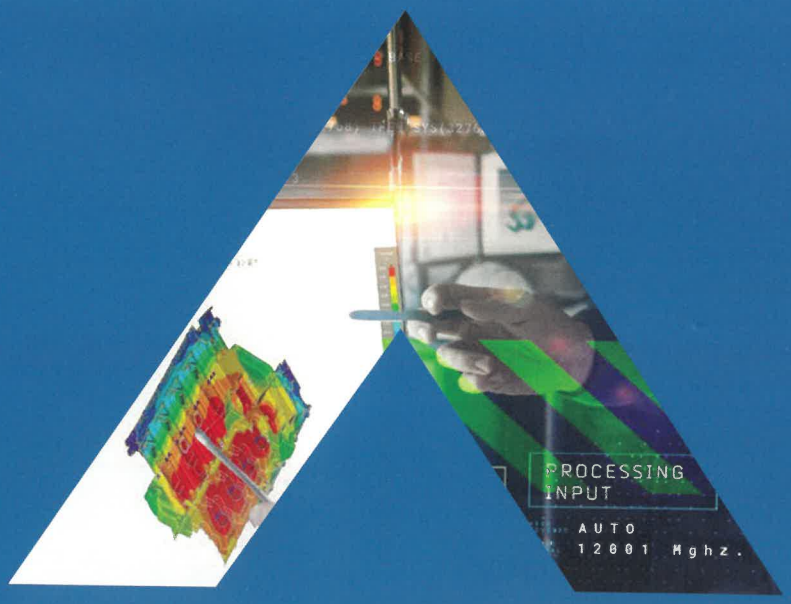


// Figura 5 - Speedup para duas densidades de malha, considerando um nó.



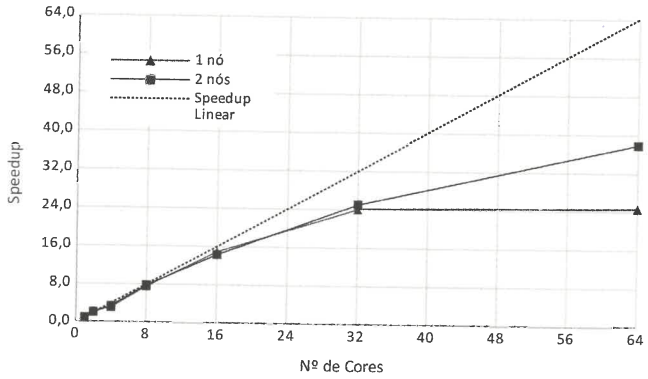
// Figura 6 - Eficiência para duas densidades de malha, considerando um nó.

De forma a tentar melhorar o desempenho, é considerada uma distribuição equilibrada das unidades de processamento entre 2 nós. Neste caso, é apenas considerada a malha com 12.7 milhões de células. Como se pode observar na Figura 7 e Figura 8, o comportamento para ambos os casos é bastante semelhante, com exceção do caso com 64 *cores*, em que existe um aumento de 13.4 e 0.21 no *speedup* e na eficiência, respetivamente. A utilização do Navigator com 64 *cores* em dois nós permite reduzir o tempo de execução num fator de 12.3 quando comparado com a *workstation* com 4 *cores*.

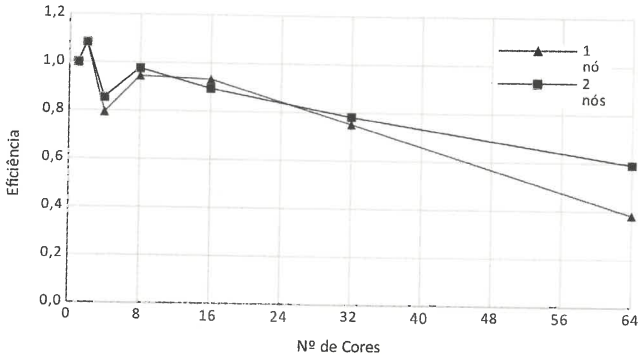


CAD | PLM | SIMULAÇÃO | IOT | REALIDADE AUMENTADA | IMPRESSÃO 3D

tca.pt



/ / Figura 7 - Speedup considerando configurações com 1 e 2 nós.



/ / Figura 8 - Eficiência considerando configurações com 1 e 2 nós.

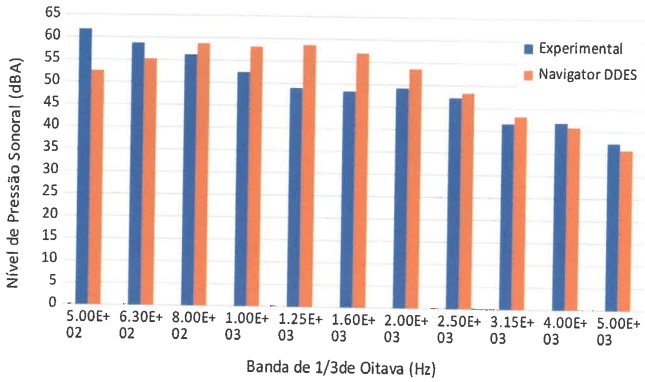
SIMULAÇÃO AERO-ACÚSTICA

De forma a realizar uma análise aero-acústica, a simulação numérica necessita de capturar as instabilidades do escoamento decorrentes dos efeitos de turbulência. Os modelos do tipo *Reynolds-Average Navier-Stokes* (RANS) não são, de uma forma geral, capazes de representar estas instabilidades. Por essa razão, é necessário utilizar *Scale Resolving Simulations* (SRS) que capturem os movimentos instáveis em diferentes escalas de turbulência. No entanto, estes métodos apresentam custos computacionais bastante elevados devido à necessidade de utilizar malhas bastante refinadas que capturem os efeitos de turbulência no escoamento. No presente caso, foi considerado o modelo *Detached Eddy Simulation* (DES) utilizando a malha de 12.7 milhões de células.

De forma a capturar as frequências de interesse, o incremento de tempo deverá ser bastante reduzido. Na simulação do ventilador foi considerado um incremento de tempo (de simulação) de $5x10^{-5}$ s. É necessário correr a simulação até que o escoamento esteja completamente desenvolvido, o que ocorre por volta dos 0.3s. Posteriormente, a simulação é corrida durante mais 0.15s de forma a realizar a análise acústica. Isto resulta num tempo de simulação de 0.45s que, de acordo com o incremento de tempo definido, corresponde a 9000 incrementos. Considerando que cada incremento pode envolver entre 5 a 20 iterações até ser obtida convergência, resulta num total entre 45k e180k iterações.

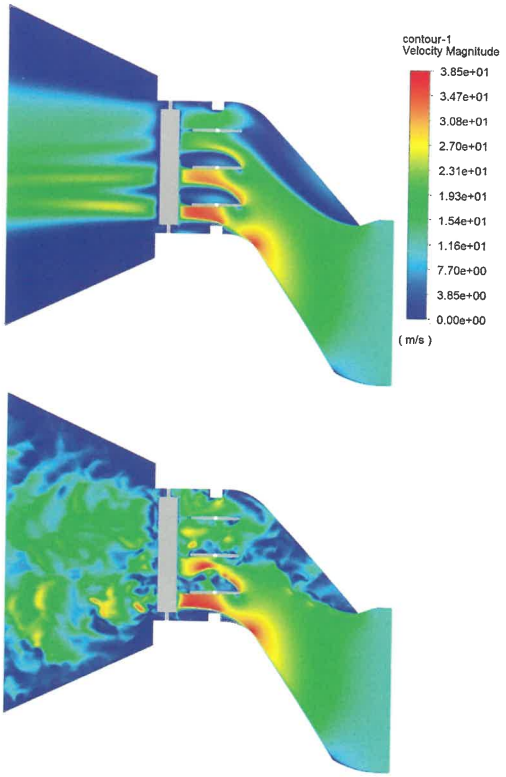
Foi utilizada a configuração com 64 *cores* distribuídos por 2 nós. O tempo de execução total foi de aproximadamente 144h (seis dias). Se a simulação fosse realizada numa workstation com limitação de 4 *cores*, o tempo de execução necessário seria de aproximadamente 74 dias. Este resultado demonstra claramente a vantagem de utilizar computação de alto desempenho para problemas complexos.

Na Figura 9 é apresentada a comparação entre os resultados numéricos e experimentais. Existe uma boa concordância entre os dados numéricos e experimentais, principalmente para frequências mais elevadas. Existe alguma variação na zona central do espetro analisado, mas uma calibração mais profunda do modelo numérico poderá conduzir a melhores resultados. No entanto, esse é um estudo que irá ser realizado futuramente, uma vez que o presente trabalho tem como principal objetivo demonstrar os ganhos provenientes da utilização de HPC.



/ / Figura 9 – Comparação entre os dados numéricos e experimentais.

O campo de velocidades para o regime estacionário (tempo de escoamento de 0s) e para um tempo de escoamento para 0.25s é apresentado na Figura 10. O caso estacionário, que emprega modelos do tipo RANS, apenas consegue descrever o comportamento médio do escoamento, mas é computacionalmente menos dispendioso (cerca de 30 minutos para a malha com 12.7 milhões de células utilizando o Navigator). Por outro lado, utilizando o modelo DES, é possível descrever de forma mais detalhada os efeitos de turbulência e este é um fator crucial para realizar uma análise aero-acústica precisa. No entanto, esta abordagem necessita de um tempo de cálculo bastante superior (144h no Navigator).



/ / Figura 10 – Campo de velocidades para o caso (esquerda) estacionário com RANS e (direita) para tempo de escoamento de 0.25s com o modelo DES.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, realizado no âmbito da iniciativa SHAPE do projeto PRACE, o desempenho do *Cluster Navigator* para computação de alto desempenho (HPC) foi avaliado para um problema complexo de Mecânica dos Fluidos Computacional. O modelo considerado corresponde a uma conduta AVAC simplificada de um veículo automóvel. Foi realizada uma análise aero-acústica que necessita de elevados recursos computacionais devido às malhas densas e pequenos incrementos de tempo.

Quando comparado com a *workstation* de 4 *cores*, a utilização do Navigator com 64 *cores* distribuídos em dois nós permite reduzir o tempo de computação num fator de aproximadamente 12.3. A simulação completa necessitou de um tempo de execução de aproximadamente 144h. A mesma simulação, realizada na *workstation* de 4 *cores*, necessitaria de aproximadamente 74 dias. Os resultados obtidos estão em concordância com os dados experimentais, especialmente para as gamas de frequência mais elevadas

Análises numéricas deste tipo apresentam bastantes benefícios para as indústrias dos moldes e plásticos, uma vez que permitem desenvolver e analisar novos conceitos durante as etapas iniciais de projeto, reduzindo ou evitando alterações posteriores que apresentam custos mais significativos.

Os resultados obtidos evidenciam ainda os benefícios da utilização de HPC, sendo estes especialmente relevantes para PME que não possuam *in-house* o *hardware* de processamento necessário para resolver problemas complexos e computacionalmente dispendiosos.

É ainda importante ter em conta que o caso estudado é apenas uma das possíveis aplicações dos recursos HPC. Com conceitos como *Big Data, Internet of Things* (IoT) e *Digital Twin* a serem cada vez mais comuns, a utilização de HPC poderá dar às PME acesso a ferramentas que permitam otimizar os seus processos, aumentar a produtividade e reduzir custos relacionados com o desenvolvimento de novos produtos, tornando-as, desta forma, mais competitivas no mercado atual.

AGRADECIMENTOS

Este estudo teve incentivo do projeto PRACE financiado em parte pelo programa EU's Horizon 2020 Research and Innovation (2014-2020) com a referência 823767. Os autores gostariam de agradecer ao Prof. A. Gameiro (Universidade de Coimbra) e ao Dr. M. Fontul (Iber-Oleff) pela partilha de conhecimento e discussões científicas. Os autores agradecem ainda à equipa de administração da UC-LCA, em particular ao Bruno Andrade, pela preparação e teste inicial do Ansys Fluent no ambiente do *cluster* Navigator.