

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA APLICAÇÃO E MEDIÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA DE LN₂ PARA USO EM USINAGEM

Matheus Emmanuel Pereira Fernandes, matheusepf@ufrn.edu.br¹

Caio Vinícius Carlos Frutuoso, cvcfrutuoso@hotmail.com¹

Anderson Clayton Alves Melo, anderson@ufrnet.br

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, RN, Brasil

Resumo: Nos dias atuais tem crescido a preocupação acerca dos impactos sociais provocados pelas indústrias. Além da grande demanda industrial por maior produtividade em produtos com resistência elevada, que geram altas temperaturas em seu processo de fabricação. Como consequência, as indústrias estão estimulando o desenvolvimento da inovação, como por exemplo, novos métodos de refrigeração. Em decorrência disso, tem surgido diversos trabalhos que mostram que a usinagem com nitrogênio líquido (LN₂) vem mostrando resultados bem-sucedidos. Porém, para que esse método de refrigeração seja difundido industrialmente é preciso que ele seja viável economicamente. Nesse pensamento, esse trabalho tem como objetivo a criação de um sistema de medição da vazão mássica de LN₂ em um modelo de aplicação de LN₂ desenvolvido no Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com vistas na otimização da quantidade de nitrogênio líquido necessária para obtenção de resultados técnicos satisfatórios. A medição da vazão mássica é feita por células de carga, baseadas em extensômetros. Foram feitos testes com células de carga, que ficam postas na base do botijão, com a finalidade de medição da vazão mássica do sistema para vários níveis de abertura das válvulas de descarga. Estas células de carga são ligadas em um sistema de aquisição de dados.

Palavras-chave: Usinagem criogênica, vazão mássica, sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

Atualmente tem-se dado grande atenção a questões relacionadas à sustentabilidade econômica, social e ambiental em praticamente todas as áreas da atuação humana (Lu; Jawahir, 2015). Tal tendência não é diferente na indústria de usinagem, que vem buscando alternativas tecnicamente eficientes do ponto de vista do processo, aliadas às questões de sustentabilidade. A definição geral de desenvolvimento sustentável fornecida pelo Dr. Brundtland (Brundtland, 1987) em seu relatório “Our Common Future”, afirma que o desenvolvimento sustentável é aquele capaz de atender às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade de suprir as necessidades das gerações futuras.

Na indústria de usinagem, os fluidos de corte são amplamente utilizados. Pois eles atuam como lubrificante e refrigerante, reduzindo os problemas associados a geração excessiva de calor como o aumento da taxa de desgaste da ferramenta (Machado et al., 2009), a diminuição da qualidade da superfície usinada (M’saoubi et al., 2014; Jawahir et al., 2011) e na redução da resistência à fadiga da peça (Pu et al., 2012). Porém, o uso intenso e deliberado de fluidos de cortes convencionais, vem de encontro ao pensamento do que seria sustentabilidade dada pelo Dr. Brundtland (1987). Nesse sentido, os fluidos de corte convencionais têm sido apontados como grandes vilões (Hannu et al., 2013; Lawal; Choudhury; Nukman, 2012; Shokrani; Dhokia; Newman, 2012).

Uma alternativa que vem sendo apontada e investigada é o uso de fluidos criogênicos, tal como o LN₂ (nitrogênio líquido), que vem apresentando resultados tecnicamente relevantes (Kaynak; Lu; Jawahir, 2014; Shokrani; Dhokia; Newman, 2012; Umbrello; Micari; Jawahir, 2012). Porém, existe uma deficiência com relação a artigos científicos que mostram a viabilidade técnica e econômica do uso de LN₂.

A partir da medição da vazão mássica de LN₂, será possível determinar os custos e discutir aspectos econômicos relativos ao uso de LN₂ como fluido de corte nos processos de usinagem. Dessa forma, o desenvolvimento do sistema possibilitará novas pesquisas que estarão alinhadas com os princípios da usinagem sustentável: redução do impacto ambiental, eficiência energética aprimorada, minimização da geração de resíduos, melhoria da segurança operacional e manutenção da qualidade do produto e dos processos (Lu; Jawahir, 2015).

Portanto, esse trabalho tem como objetivo a criação de um sistema de medição de vazão mássica de LN₂ em um modelo de aplicação de LN₂ desenvolvido para processos de usinagem convencionais.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A medição da vazão mássica é feita por células de carga, baseadas em extensômetros. Para tanto, foi usado o sistema de aplicação de LN2 que foi desenvolvido no Laboratório de Manufatura da UFRN por Oliveira (Oliveira, 2015) e Leadebal Jr. (Leadebal Jr., 2017; Leadebal Jr. et al., 2018). A Fig. 1 mostra esse sistema.

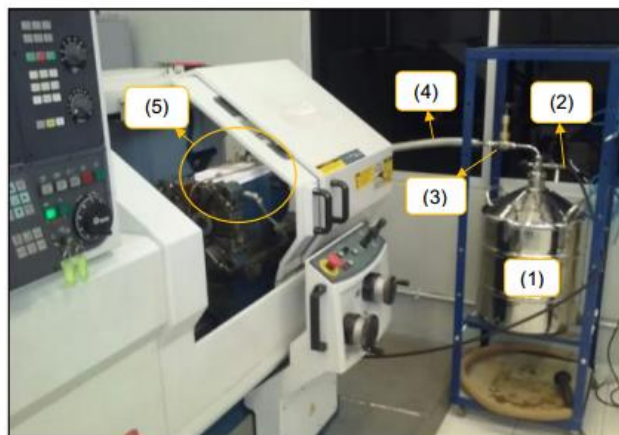


Figura 1: Bancada de ensaios mostrando o sistema de aplicação de LN2 do Laboratório de Manufatura da UFRN (Leadebal Jr., 2017).

Neste sistema, a extração do LN2 do botijão (1) é feita por meio da injeção de ar comprimido no interior do botijão através do ponto (2). Isto faz com que a pressão interna seja elevada, impelindo o nitrogênio líquido através da válvula (3) e mangueira (4), indo até o ponto de descarga (zona de corte), em (5). A Fig. 2 é um esquema que mostra como se dá o processo de retirada do LN2 do botijão.

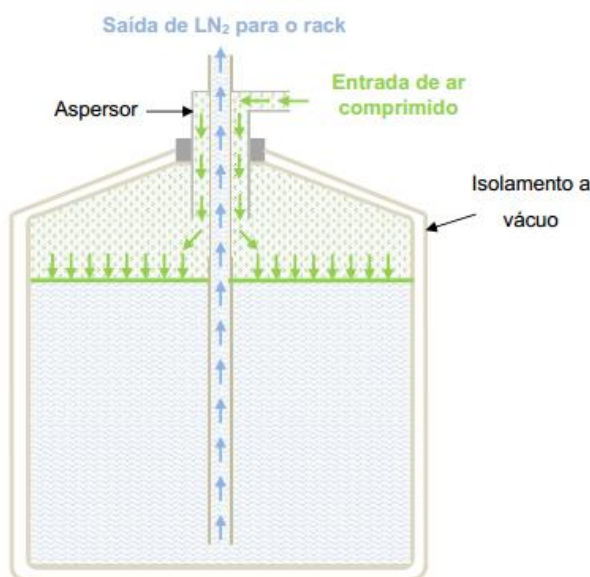


Figura 2: Esquema mostrando como se dá a retirada de nitrogênio líquido do interior do botijão (Leadebal Jr., 2017).

No sistema mostrado acima, sempre existe a entrada de massa de ar comprimido no interior do botijão, o que dificultaria bastante a quantificação do consumo de LN2, através da medição da vazão mássica por meio de células de carga. Assim, o sistema foi modificado, eliminando a entrada de ar comprimido e adicionado uma resistência elétrica de Nicromo (32Ω) dentro do botijão de LN2, conforme mostra a Fig. 3. O aquecimento da resistência elétrica, através de uma fonte variavolt, provoca a vaporização de parte do LN2 no interior do botijão e, como este se encontra totalmente vedado, sua pressão interna é aumentada, fazendo com que o LN2 seja expulso do mesmo, semelhantemente ao mostrado na Fig. 2.

Testes foram realizados e o sistema funcionou adequadamente, mantendo uma pressão no interior do botijão igual a 1.8 bar. Esta pressão foi escolhida com o intuito de garantir uma margem de segurança para o processo uma vez que a

pressão máxima suportada pelo cilindro utilizado é de 2 bar. A Fig. 4 mostra o LN2 saindo pelos dois bicos do *manifold* que normalmente é montado no torno CNC que é usado nos experimentos.



Figura 3: (a) Aspersor modificado com sistema de aquecimento por resistência elétrica; (b) Zoom mostrando a resistência elétrica envolta de uma peça de technyl®.



Figura 4: LN2 saindo pelos dois pontos de descarga do *manifold* durante pré-testes com o novo sistema.

O sistema de medição de vazão é constituído de um suporte com três células de carga, onde o botijão é apoiado, um amplificador de sinal, que recebe os dados das células de carga, o computador que faz a leitura e armazenamento dos dados amplificados e um varivolt que controla a tensão (consequentemente a corrente elétrica e potência) que vai para a resistência elétrica dentro do botijão.



Figura 5: Sistema de medição de vazão mássica de LN2.

Foram feitos testes nesse sistema em um ambiente controlado com temperatura de 22°C. Inicialmente o botijão de LN2 foi posto no suporte com cerca de 27 kg de nitrogênio líquido e pressão do botijão de 0 bar. Os valores das células de cargas foram zerados com botijão já no suporte e o varivolt foi ligado com 80v, gerando uma corrente aproximada de 2,5 A e uma potência de 200W. Depois de 38 minutos o manômetro chegou em 1,8 bar, com isso foi feita a abertura da válvula criogênica e a tensão reduzida para 40v para economia de energia.

Com a pressão interna do botijão constante (1,8 bar), foram feitos testes com as duas válvulas do *manifold* totalmente abertas. Em seguida foi realizado o mesmo procedimento com uma das válvulas do *manifold* totalmente aberta enquanto a outra válvula estava totalmente fechada durante 30 minutos ou até o nitrogênio líquido secar.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados dos experimentos descritos anteriormente. O gráfico da Fig. 6 representa a perda de massa em função do tempo percorrido com as duas válvulas do *manifold* totalmente abertas (vazão máxima).

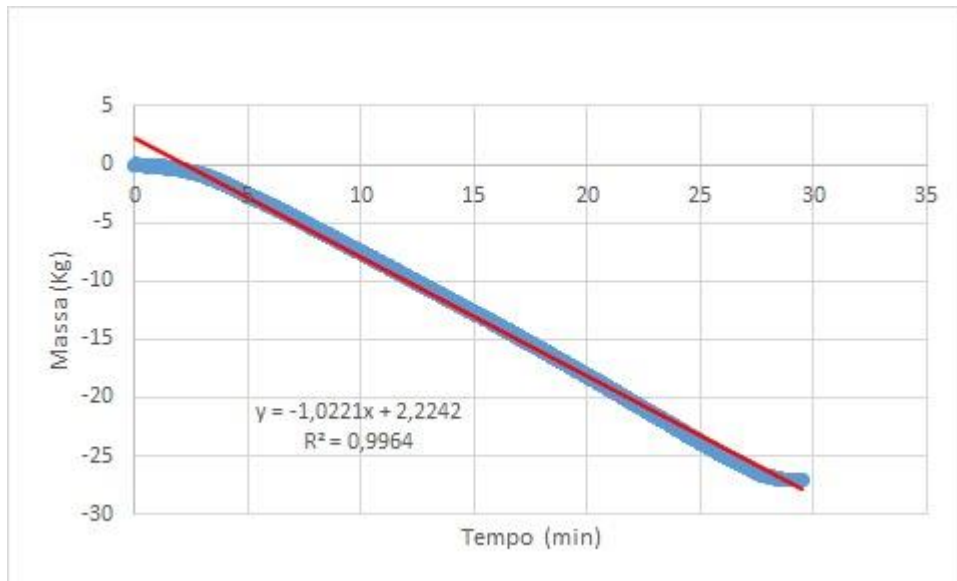


Figura 6: Gráfico da perda de massa pelo tempo com as duas válvulas abertas.

É possível notar que inicialmente, a saída de massa leva um tempo para se estabilizar, logo mais, ele se mantém linear até que todo o LN2 seja consumido. Com base na aproximação linear dos dados coletados, foi obtido um modelo matemático que relaciona a perda de massa de LN2 com o tempo, ver Eq. (1).

$$m_1 = -1,0221t + 2,2242 \quad (1)$$

O cálculo da vazão foi feito dividindo a massa perdida pelo tempo gasto e pela densidade do LN2, conforme cálculo na Eq. (2).

$$Q = \frac{27 \text{ kg} \cdot 1000 \text{ l}}{\left(0,4731 \text{ h} \cdot 808,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} = 70,61 \text{ l/h} \quad (2)$$

O gráfico da Fig. 7 apresenta a perda de massa do botijão em função do tempo percorrido com uma das válvulas do *manifold* totalmente aberta enquanto a outra válvula do *manifold* se encontrava totalmente fechada.

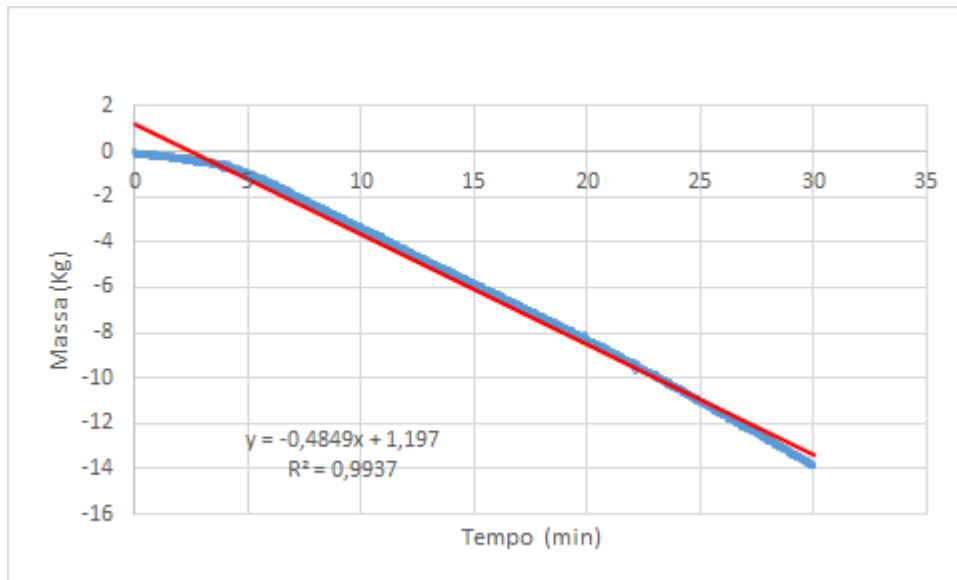


Figura 7: Gráfico da perda de massa pelo tempo com apenas uma das válvulas aberta.

É possível notar, semelhante a Fig. 6, inicialmente a saída de massa leva um tempo para se estabilizar, logo mais, ele se mantém linear. Com base na aproximação linear dos dados coletados, também foi possível obter um modelo matemático que relaciona a perda de massa de LN2 com o tempo, para o caso em que só uma das válvulas está aberta, ver Eq. (3).

$$m_2 = -0,4849t + 1,197 \quad (3)$$

O cálculo da vazão foi feito dividindo a massa perdida pelo tempo gasto e pela densidade do LN2, conforme calculo na Eq. (4).

$$Q = \frac{13,85 \text{ kg} \cdot 1000 \text{ l}}{(0,5 \text{ h} \cdot 808,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} = 34,27 \text{ l/h} \quad (4)$$

4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu consolidar a possibilidade de medição da vazão de LN2 por meio da utilização das células de carga acopladas ao sistema de aplicação existente, juntamente com o aparato de aquisição de dados. O sistema desenvolvido possibilitará a medição do consumo de LN2 em processos de usinagem como o torneamento, para em seguida analisar a viabilidade econômica do uso de LN2 como alternativa aos fluidos de corte convencionais.

Com esses resultados foi possível descobrir como nitrogênio líquido se comporta para diferentes vazões. Usufruindo de um sistema de aplicação de LN2 que pode ser quantificado, escolhendo a vazão desejada para o processo de usinagem. O sistema de aplicação de LN2 se demonstrou ser linear, além disso, quando apenas uma das válvulas estava aberta a vazão caiu aproximadamente pela metade.

Trabalhos futuros poderão ser feitos variando-se diferentes aberturas de válvulas, como por exemplo, usando-se as duas válvulas abertas pela metade, ou ainda com as duas válvulas com um terço de abertura e assim por diante. E em seguida, aplicar cada vazão no processo de usinagem.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a DINATEST pela doação da atualização do software usado para leitura das células de cargas, ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica (PPGEM/UFRN) e a agência de financiamento CAPES.

6. REFERÊNCIAS

- Brundtland, G. H. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. United Nations Commission, v. 4, n. 1, p. 300, 1987.
- Hannu, T.; Suuronen, K.; Aalto-Korte, K.; Alanko, K.; Luukkonen, R.; Järvelä, M.; Jolanki, R.; Jaakkola, M. S. Occupational respiratory and skin diseases among Finnish machinists: Findings of a large clinical study. International Archives of Occupational and Environmental Health, v. 86, n. 2, p. 189–197, 2013.

- Jawahir, I. S.; Brinksmeier, E.; M'Saoubi, R.; Aspinwall, D. K.; Outeiro, J. C.; Meyer, D.; Umbrello, D.; Jayal, A. D. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 60, n. 2, p. 603–626, 2011.
- Kaynak, Y.; Lu, T.; Jawahir, I. S. Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and comparison with dry, mql, and flood-cooled machining. *Machining Science and Technology*, v. 18, n. 2, p. 149–198, 2014.
- Lawal, S. A.; Choudhury, I. A.; Nukman, Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals - A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 52, n. 1, p. 1–12, 2012.
- Leadebal Jr., W. V. Influência da refrigeração criogênica na vida da ferramenta de PCBN e na integridade superficial do aço ferramenta D6. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.
- Leadebal Jr, W. V.; Melo, A. C. A.; Oliveira, A. J.; Castro, N. A. Effects of cryogenic cooling on the surface integrity in hard turning of AISI D6 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 1, p. 1-15, 2018.
- Lu, T.; jawahir, I. S. Metrics-based Sustainability Evaluation of Cryogenic Machining. *Procedia CIRP*, v. 29, p. 520–525, 2015.
- M'saoubi, R.; Axinte, D.; Herbert, C.; Hardy, M.; Salmon, P. Surface integrity of nickel-based alloys subjected to severe plastic deformation by abusive drilling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 63, n. 1, p. 61–64, 2014.
- Machado, A. R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009..
- Oliveira, R. F. DE. Estudo do Desempenho de Ferramentas de Aço-Rápido na Usinagem Criogênica do Aço ABNT 1020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- PU, Z. et al. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 56, p. 17–27, 2012.
- Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 57, p. 83–101, 2012.
- Umbrello, D.; Micari, F.; Jawahir, I. S. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 61, n. 1, p. 103–106, 2012.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO APPLY AND MEASURE THE LN2 MACHINE FLOW FOR USE IN MACHINING

Matheus Emmanuel Pereira Fernandes, matheusepf@ufrn.edu.br¹
Caio Vinícius Carlos Frutuoso, cvcfrutuoso@hotmail.com¹
Anderson Clayton Alves Melo, anderson@ufrnet.br

¹Federal University of Rio Grande do Norte, UFRN, RN, Brazil.

Abstract. *In recent days, it has grown the trouble about environmental impacts caused by industries. In addition, higher industrial demands for more productivity in products with superior resistance that generates high temperatures in its manufacturing process. As a result, some industries are stimulating the advance of innovation, as the example of new cooling methods. Because of that, it has emerged some works that claims machining with liquid nitrogen (LN2) has shown successful results. Although, to this cooling method be widespread through industry it must be economically practicable. In this thought, this work has the objective to create a system for the measurement of mass flow of LN2 based on a model of LN2 application developed in the Laboratory of Manufacturing of the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), looking at the optimization of the quantity of liquid nitrogen necessary for obtaining satisfactory technical results. The measurement of mass flow was made by load cells, based in extensometers. It was make tests with load cells, which stays fixed in the base of the cylinder, with the goal to measure the mass flow of the system for multiples opening levels of the discharge valves. These load cells were connected in a data acquisition system.*

Keywords: *Cryogenic Machining, mass flow, sustainability*