Delft University of Technology

Document Version
Final published version

Licence
CC BY

Citation (APA)
Grassi, J., Quaroni, L. N., Merino Martinez, R., Ragni, D., & Prodi, N. (2026). Approccio basato su XFOIL per la predizione del rumore di eliche a basso numero di Reynolds. In *Proceedings of the 52nd National Conference of the Acoustical Society of Italy*

Important note
To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright
In case the licence states “Dutch Copyright Act (Article 25fa)”, this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy
Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

This work is downloaded from Delft University of Technology.

Associazione Italiana di Acustica
52° Convegno Nazionale
Perugia, 10-12 Giugno 2026

APPROCCIO BASATO SU XFOIL PER LA PREDIZIONE DEL RUMORE DI ELICHE A BASSO NUMERO DI REYNOLDS

Jacopo Grassi (1), Luca Nicola Quaroni (2), Roberto Merino Martinez (2), Daniele Ragni (2), Nicola Prodi (1)

1) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, Italia, jacopograssi@unife.it
2) Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, L.N.Quaroni@tudelft.nl

SOMMARIO

Viene presentata una metodologia semplificata per la stima del rumore generato da eliche operanti a bassi numeri di Reynolds. L'approccio si basa su simulazioni aerodinamiche bidimensionali eseguite esclusivamente con il software XFOIL, evitando il ricorso a onerose simulazioni tridimensionali. L'emissione tonale e a banda larga è stimata tramite modelli semi-analitici. Il confronto con misure in galleria del vento mostra un RMSE di circa 1.9 dB nel range 800 Hz–20 kHz.

1. Introduzione

L'impiego di velivoli a pilotaggio remoto (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) richiede una stima preventiva del rumore emesso da eliche a basso numero di Reynolds. Operando frequentemente a distanza ravvicinata dagli individui e alla luce delle rigorose normative vigenti in materia di emissioni sonore [1], la previsione dell'impatto acustico diviene un requisito fondamentale già nelle prime fasi di progetto. In questo contesto, lo studio evidenzia le potenzialità dell'utilizzo di modelli semi-analitici alimentati da simulazioni aerodinamiche di sezioni di pala operanti a bassi numeri di Reynolds. Tali simulazioni sono eseguite esclusivamente mediante il software XFOIL [2], senza ricorrere a metodi tridimensionali più onerosi, al fine di stimare i carichi aerodinamici e le caratteristiche dello strato limite.

2. Rumore di rotori aperti

Nel presente lavoro l'analisi è focalizzata solo su alcune sorgenti, ovvero, le forze stazionarie scambiate tra la pala e l'aria, lo spostamento del volume d'aria indotto dal moto della pala [3], l'impatto della turbolenza in ingresso sul bordo d'attacco (leading edge - LE) [4] e l'interazione dello strato limite turbolento con il bordo d'uscita (trailing edge - TE) [5]. Le componenti di carico stazionario e di spessore, essendo fenomeni periodici sulla rotazione, contribuiscono alla generazione del rumore armonico con frequenza fondamentale pari alla frequenza di passaggio pala (BPF), definita come: $f_{BPF} = B \cdot \Omega$ dove B è il numero di pale e Ω è la frequenza di rotazione dell'albero [6]. Invece, le interazioni al LE e al TE governano l'emissione a banda larga. La natura stocastica della turbolenza in ingresso e delle fluttuazioni dello strato limite in uscita eccitano un ampio e continuo spettro di frequenze [6]. Inoltre, i vortici in ingresso, stirati e intercettati da più pale successive, generano un segnale quasi-periodico che risulta in "gobbe" a banda larga attorno alle frequenze armoniche (haystacking) [6].

3. Predizione del rumore

La pala viene discretizzata nella direzione radiale in n sezioni di lunghezza variabile ΔS (o normalizzata sul raggio del rotore $dz = \Delta S/R_t$). I modelli semi-analitici si basano sull'aerodinamica di tali sezioni e da una integrazione delle sorgenti acustiche di ciascun elemento. Per alimentare i modelli sono stati calcolati parametri aerodinamici, quali forze sul profilo e caratteristiche dello strato limite, con il software XFOILtrascurando gli effetti tridimensionali e l'angolo di attacco indotto. Solamente i parametri riguardanti la turbolenza incidente sono stati valutati sperimentalmente con anemometro a filo caldo [7].

Le formulazioni dei modelli sono qui riportate in modo sintetico, per maggiori dettagli si invita la lettura degli articoli attinenti [4], [5], [8].

Assumendo un flusso in ingresso uniforme, stazionario e assialsimmetrico, il rumore tonale è predetto tramite la Helicoidal Surface Theory così formulata da Hanson [8]:

$$\begin{Bmatrix} P_{Vm} \\ P_{Dm} \\ P_{Lm} \end{Bmatrix} = A_1 \int_0^1 A_2 \begin{Bmatrix} k_x^2\, t_b\, \Psi_V(k_x) \\ ik_x\, (C_D/2)\, \Psi_D(k_x) \\ -i\, k_y\, (C_L/2)\, \Psi_L(k_x) \end{Bmatrix} dz \tag{1}$$

Dove P_{Vm}, P_{Dm}, P_{Lm} sono i coefficienti di Fourier dei segnali dell'm-esima componente armonica per le sorgenti di volume, drag e lift rispettivamente. Il segnale nel tempo è ricostruito come illustrato in Eq. (2) per poi essere processato ottenendo la Power Spectral Density (PSD) della pressione acustica S_{pp}^{A}.

$$p(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (P_{Vm} + P_{Dm} + P_{Lm})\, e^{-imB\Omega t} \tag{2}$$

I modelli di Amiet [4], [5] per la predizione del rumore a banda larga approssimano il profilo alare ad una lastra piana infinita. Per essere utilizzati quando sono presenti rotazioni, richiedono la discretizzazione del piano di rotazione in settori azimutali in cui la lastra percorre una traiettoria rettilinea. Il modello TE prevede l'ipotesi che il campo di velocità turbolenta non sia alterato dalla presenza del profilo; inoltre, sono trascurati gli effetti delle raffiche asimmetriche e della convezione del flusso medio. Il modello LE assume turbolenza incidente congelata, omogenea e isotropa, includendo la correlazione tra pale.

$$S_{pp,i}^{TE} = A_3 \Delta S |\mathcal{L}|^2 \Phi_{pp} \qquad S_{pp,i}^{LE} = A_4 \Delta S |\mathcal{L}|^2 \Phi_{ww} \tag{3}$$

Le Eq. (3) calcolano direttamente la PSD della pressione acustica al TE e al LE per un singolo elemento di pala. Per il TE si calcolano e si sommano tra loro i contributi provenienti dal ventre e dal dorso della lastra, poi moltiplicati per un fattore 4 per tenere conto del backscattering.

Il rumore totale predetto viene calcolato con la seguente:

$$SPL(f) = 10 \log \left[\frac{2\pi \Delta f \left(S_{pp}^{TE}(\omega) + S_{pp}^{LE}(\omega) + S_{pp}^{\mathrm{A}}(\omega) \right)}{P_{ref}^2} \right] \tag{4}$$

Associazione Italiana di Acustica, 2026
ISBN: 978-88-88942-71-1

CC BY

Dove Δf è la risoluzione spettrale e $P_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}\ Pa$.

4. Setup di misura

Le misure sperimentali sono state condotte sulla elica X-PROP-S [9] come descritto in [7], in una galleria del vento anecoica a getto aperto, nota come "A-Tunnel" presso TU Delft. Maggiori informazioni sulla galleria e sul setup sono disponibili in [10]. L'elica consta di 6 pale di profili alari di tipo CLARK-Y. La geometria e le performance aerodinamiche sono riportate in [9], [11]. La turbolenza in ingresso è stata generata con una griglia metallica posta nel getto d'aria [7].

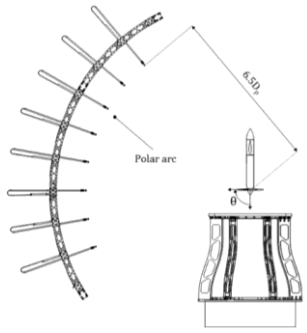

Figura 1 – Setup di misura: elica di diametro $D_p = 203.2\ mm$, getto d'aria e array polare di 8 microfoni G.R.A.S. 46BE distanti 10° tra loro.

La misura è stata corretta in termini di posizione angolare e pressione sonora per effetto della rifrazione dovuta alla presenza del getto d'aria con il metodo presentato da Amiet in [12].

5. Risultati

Il confronto tra la Power Spectral Density (PSD) misurata e quella predetta dai modelli analitici, valutata per le condizioni operative riassunte in Tab. 1, è illustrato in Fig. 2.

Tabella 1 – Condizioni operative.

Frequenza di rotazione	180.5 Hz
Blade Passing Frequency	1083 Hz
Velocità del getto	30 m/s
Intensità di turbolenza	2.65%
Integral length scale	0.0125 m
Angolo di pitch al 70 % della pala	25°

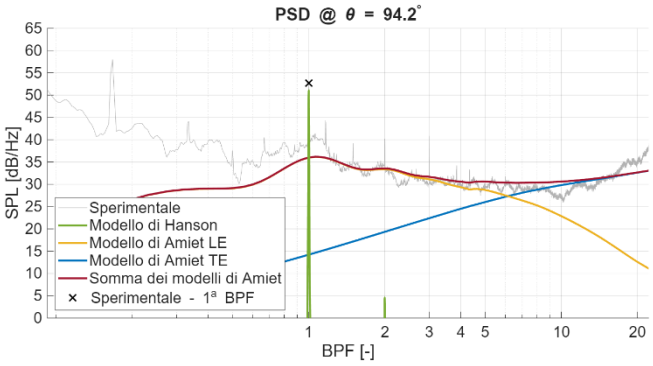

Figura 2 – PSD misurata e predetta a confronto. Posizione microfonica a 90° corretta a 94.2° (terzo microfono a partire dal basso).

La pressione acustica nel range di frequenze 800 Hz – 20 kHz è predetta con un RMSE (Root Mean Square Error) di 1.9 dB. L'OSPL (Overall Sound Pressure Level) modellato, valutato nello stesso range, presenta uno scostamento in difetto dell'ordine dei decimi di decibel.

Il rumore tonale alla prima BPF è inferiore al valore sperimentale di 1.5 dB, mentre le armoniche di ordine superiore risultano largamente sottostimate. Questo mancato accordo è attribuito alla mancata considerazione dei fenomeni non stazionari che alimentano l'energia acustica armonica.

6. Conclusioni

Viene presentata e validata una metodologia semplificata per la predizione del rumore di eliche operanti a basso numero di Reynolds, basata esclusivamente su XFOIL.

Il confronto con le misure sperimentali mostra che l'approccio è in grado di fornire previsioni affidabili sul piano del rotore. Ciò avviene nonostante l'impiego di un'analisi aerodinamica puramente bidimensionale per la stima dei carichi stazionari e delle caratteristiche dello strato limite. In particolare, nel range 800 Hz – 20 kHz si ottiene un RMSE pari a 1.9 dB, mentre l'OSPL risulta sottostimato di pochi decimi di decibel.

Il framework proposto consente una minimizzazione del costo computazionale, mantenendo al contempo una buona accuratezza nella stima dell'emissione acustica. Esso si configura quindi come uno strumento strategico per la valutazione dell'impatto sonoro nelle prime fasi di progettazione del rotore.

Gli sviluppi futuri dovranno essere orientati al miglioramento della modellazione della componente armonica, attualmente sottostimata alle armoniche di ordine superiore al fine di incrementarne ulteriormente l'accuratezza complessiva.

7. Bibliografia

[1] European Union Aviation Safety Agency, «Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945)»

[2] M. Drela, «XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils», in *Low Reynolds Number Aerodynamics*, vol. 54, T. J. Mueller, A c. di, in Lecture Notes in Engineering, vol. 54. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989, pp. 1–12. doi: 10.1007/978-3-642-84010-4_1.

[3] H. H. Hubbard, «Aeroacoustics of Flight Vehickes: Theory and Practice - Volume 1: Noise Sources», NASA, Hampton, Virginia, 90–3052, 1991.

[4] R. K. Amiet, «Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream», *J. Sound Vib.*, vol. 41, fasc. 4, pp. 407–420, ago. 1975, doi: 10.1016/S0022-460X(75)80105-2.

[5] R. K. Amiet, «Noise due to turbulent flow past a trailing edge», *J. Sound Vib.*, vol. 47, fasc. 3, pp. 387–393, ago. 1976, doi: 10.1016/0022-460X(76)90948-2.

[6] S. Glegg e W. Devenport, *Aeroacoustics of low mach number flows: fundamentals, analysis and measurement*. London, England: Academic Press, 2017.

[7] L. N. Quaroni, R. Merino-Martinez, F. D. Monteiro, e S. S. Kumar, «Collective blade pitch angle effect on grid turbulence ingestion noise by an isolated propeller», in *30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024)*, Rome, Italy: American Institute of Aeronautics and Astronautics, giu. 2024. doi: 10.2514/6.2024-3209.

[8] D. B. Hanson, «Helicoidal Surface Theory for Harmonic Noise of Propellers in the Far Field», *AIAA J.*, vol. 18, fasc. 10, pp. 1213–1220, ott. 1980, doi: 10.2514/3.50873.

[9] N. van Arnhem, R. de Vries, T. Sinnige, e L. Veldhuis, «TUD-XPROP-S propeller geometry», 18 marzo 2022, *Zenodo*. doi: 10.5281/ZENODO.6355670.

[10] R. Merino-Martínez *et al.*, «Aeroacoustic design and characterization of the 3D-printed, open-jet, anechoic wind tunnel of Delft University of Technology», *Appl. Acoust.*, vol. 170, p. 107504, dic. 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107504.

[11] N. Van Arnhem, R. De Vries, T. Sinnige, R. Vos, G. Eitelberg, e L. L. M. Veldhuis, «Engineering Method to Estimate the Blade Loading of Propellers in Nonuniform Flow», *AIAA J.*, vol. 58, fasc. 12, pp. 5332–5346, dic. 2020, doi: 10.2514/1.J059485.

[12] R. Amiet, «Correction of open jet wind tunnel measurements for shear layer refraction», in *2nd Aeroacoustics Conference*, Hampton,VA,U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, mar. 1975. doi: 10.2514/6.1975-532.