

# Sensoristica in ambiente estremo: l'interno di una turbina Baker Hughes

*Gabrio Martini, Laurent Ntibarikure, Stefano Selleri, Viola Sorrentino*

Le Fonderie del Pignone sono una storica azienda fiorentina la cui fondazione risale al 1842, poi divenuta Nuovo Pignone nel secondo dopoguerra. Nel 1993 venne acquisita dalla General Electric e tale rimase fino al 2019, quando Baker Hughes acquistò alcune quote dalla General Electric fino ad arrivare ad oggi, quando è divenuta totalmente di proprietà Baker Hughes continuando però a conservare la sua leadership mondiale per la produzione di compressori centrifughi, alternativi e turbine a gas.

La collaborazione fra il laboratorio RF, Microonde ed Elettromagnetismo, di cui è responsabile il Prof. Giuseppe Pelosi, del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione con l'azienda si colloca nel periodo General Electric, un periodo nel quale la direzione statunitense dette maggior impulso alla ricerca, finanziando borse di studio di dottorato, delle quali uno degli autori di questo contributo ha usufruito dal 2011 al 2013 ottenendo il titolo con la tesi *Contribution to the art of finite element analysis in electromagnetics*.

La collaborazione è continuata anche successivamente con altre ricerche che hanno caratterizzato lo studio della compatibilità elettromagnetica di sensoristica e sistemi di acquisizione posti in ambiente industriale in presenza di motori e driver elettrici da cui la tesi di dottorato 'EMC/EMI in ambienti industriali con azionamenti elettrici a velocità variabile', così come di applicazione del metodo agli elementi finiti a problemi di propagazione elettromagnetica all'interno di una turbina, sempre per problemi di sensoristica.

Uno dei principali problemi riscontrati ancora oggi nella strumentazione di prototipi resta comunque sempre l'utilizzo corretto di sensoristica in ambiente industriale fortemente contaminato da disturbi elettromagnetici e spesso in assenza di dedicate terre di strumentazione.

Gabrio Martini, Baker Hughes, Italy, gabrio.martini@bakerhughes.com  
Laurent Ntibarikure, NXP Semiconductors, Netherlands, laurent.ntibarikure@nxp.com, 0009-0006-4601-3618  
Stefano Selleri, University of Florence, Italy, stefano.selleri@unifi.it, 0000-0003-3090-1451  
Viola Sorrentino, Baker Hughes, Italy, viola.sorrentino@unifi.it

Referee List (DOI 10.36253/fup\_referee\_list)  
FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup\_best\_practice)

Gabrio Martini, Laurent Ntibarikure, Stefano Selleri, Viola Sorrentino, *Sensoristica in ambiente estremo: l'interno di una turbina Baker Hughes*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5.30, in Stefano Selleri, Alberto Tesi, Enrico Vicario (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 2. Ingegneria dell'Informazione*, pp. 117-120, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0975-5, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5

Per ovviare a queste mancanze è stato progettato (internamente a Nuovo Pignone) un particolare dispositivo elettronico di condizionamento di segnali che potrebbe essere oggetto di studio futuro per rinnovarne elettronica e funzionalità.

Il dispositivo in questione classificato 'trade secret' aziendale resta tutt'oggi, insieme all'uso delle tecniche di mitigazione dei disturbi canoniche, l'unica soluzione applicabile quando non sia possibile operare in ambiente elettromagneticamente pulito.

Una turbina è un ambiente in cui sono raggiunte temperature elevate e in cui sono presenti forti vibrazioni. Pertanto, durante la sua rotazione, è importante misurare grandezze fisiche come la temperatura e la deformazione, per verificare l'operatività

del sistema. Le alte temperature causano la dilatazione termica, da cui segue la deformazione dei materiali, fino a raggiungere dilatazioni dell'ordine della frazione di millimetro. Oltre alla sollecitazione termica, vi sono anche le vibrazioni dovute alla rotazione del rotore, che ruota a velocità che possono raggiungere i 12.000 giri/minuto.

È di conseguenza fondamentale una sensoristica raffinata per tenere sotto controllo costante e continuo tali deformazioni durante l'operatività della turbina. Solitamente sono impiegati degli estensimetri resistivi per la misura dello sforzo, che vengono fissati alle parti sottoposte a sollecitazione e opportunamente collegati tramite cavi agli strumenti di misura. Se questo non presenta particolari difficoltà sulla parte statorica, la parte rotorica non può essere ovviamente cablata direttamente. I cavi per il rotore vengono fatti passare attraverso la struttura rotante fino a degli anelli di scorrimento dell'albero motore che garantiscono un contatto elettrico con la parte statorica. Un sistema di misura sofisticato richiede però centinaia di sensori – e quindi di anelli – che sono elementi piuttosto fragili e soggetti a guasti frequenti.

L'attività principale della collaborazione è stata quindi lo studio di fattibilità di una sensoristica basata sulla tecnologia SAW (Surface Acoustic Wave – Onda Acustica Superficiale). Tali sensori non richiedono un sistema di alimentazione, sono passivi, leggeri e hanno dimensioni ridotte. Operano anche a temperature superiori a 600 °C e la loro resistenza agli urti e alle vibrazioni li rende durevoli in ambienti in cui vi sono forti sollecitazioni come le turbine.

Il punto centrale della collaborazione è stato poi quello di studiare la possibilità di interagire coi sensori SAW sul rotore in modo wireless, ovvero tramite un collegamento radio all'interno della turbina. L'assenza di cablaggi, e quindi di un contatto fisico diretto, consente infatti una maggiore robustezza ed affidabilità della sensoristica. Il nodo cruciale è quindi caratterizzare l'ambiente elettromagnetico estremo – con elevate temperature e parti in rapida rotazione – per garantire la comunicazione fra il sensore, progettato come un transponder passivo, e una ricetrasmittente fissata allo statore. L'ambiente operativo è quindi il volume interno alla turbina, approssimata a una cavità risonante toroidale, in cui la distribuzione del campo elettromagnetico e i relativi modi risonanti caratterizzano la possibilità di un collegamento wireless affidabile.

Inizialmente è stata studiata la distribuzione del campo elettromagnetico all'interno della cavità e sono stati identificati i suoi modi risonanti. Successivamente è stata progettata un'antenna a slot con meandri, che ha dimensioni estremamente piccole. Inserendo gli elementi radianti in turbina, la  $\text{Im}(Z_{12})$  risulta negativa, da cui si evince un'impedenza capacitiva fra questi, che causa il disaccoppiamento e una trasmissione non ottimale dell'informazione. Per risolvere tale problema, sono stati progettati accoppiatori circolari capacitivi con due differenti design della microstriscia stampata sul substrato.

Questa seconda soluzione garantisce prestazioni migliori rispetto alla prima in termini di trasmissione del segnale e soddisfa le specifiche elettromagnetiche ricevute dall'azienda. Infatti lavora alla frequenza operativa del sensore SAW (434 MHz), mo-

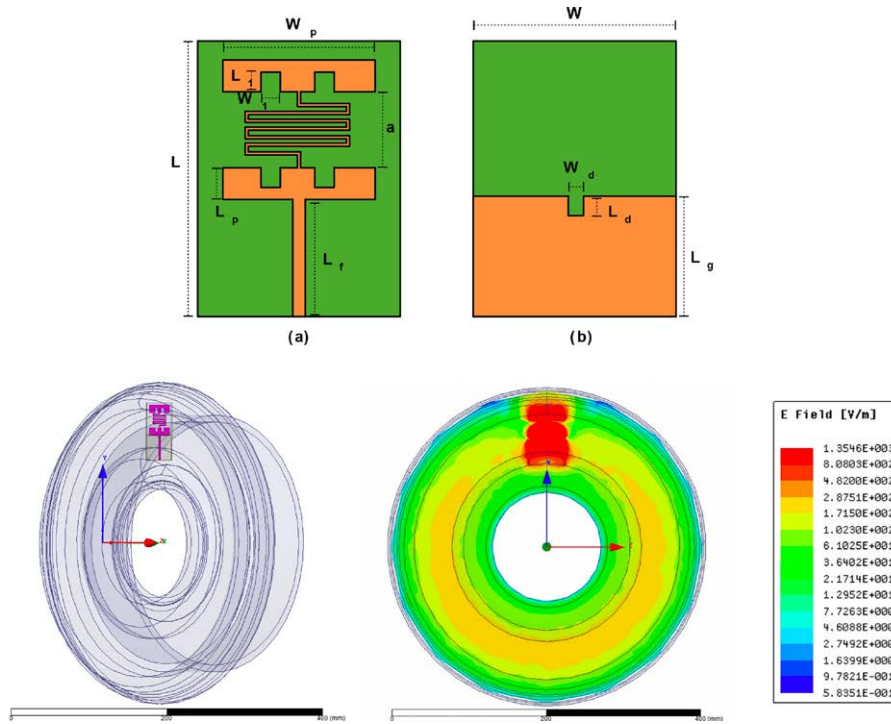


Figura 65 – Una delle diverse soluzioni studiate: un dipolo compatto progettato a 621 MHz (in alto) dimensionato per poter essere applicato sulla parte rotorica e statorica (in basso a sinistra posizionata sullo statore) e livelli di campo ottenuti nel volume di interesse (in basso a destra).

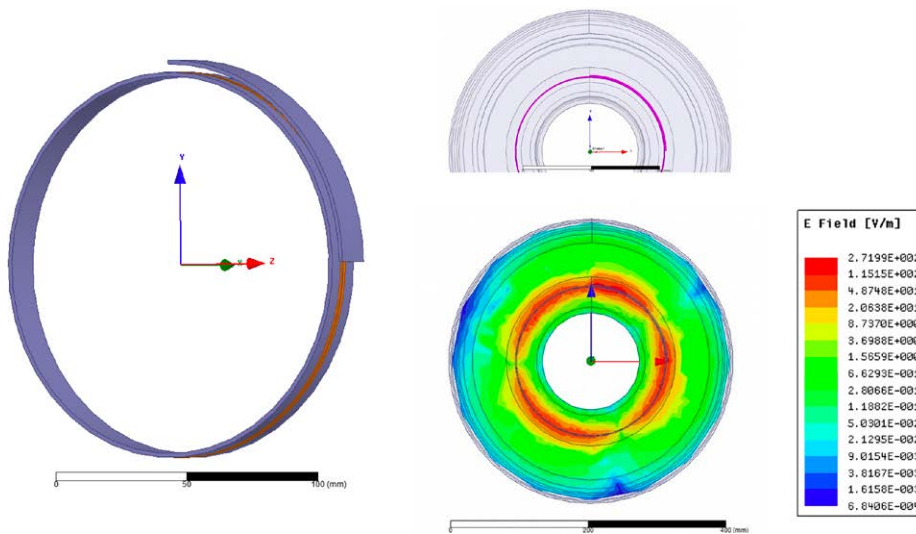


Figura 66 – Una seconda possibile soluzione: un accoppiatore direzionale capacitivo costituito da due stripline affiancate (a sinistra) suo posizionamento nella turbina (a destra in alto) e livelli di campo ottenuti nel volume di interesse (a destra in basso).

stra un'impedenza di  $50 \Omega$  a tutte le porte e limita a 3 dB la massima variazione del coefficiente di trasmissione nel range di frequenze sotto analisi. Pertanto questo accoppiatore direzionale circolare capacitivo garantisce un accoppiamento ottimale del segnale elettromagnetico all'interno della turbina, soddisfa le specifiche meccaniche di stabilità alle vibrazioni causate dalla rotazione e evita il sezionamento dell'unità statica in due parti, grazie alla sua estensione su un angolo di  $88,28^\circ$ . Tale configurazione finale è idonea anche alla produzione su larga scala, poiché progettata con il dielettrico FR408, che associa un basso costo ad una ottima qualità.

Ad oggi lo stato dell'arte della strumentazione wireless in Nuovo Pignone, quando si necessita dell'analisi delle deformazioni e delle temperature di parti rotoriche (ad esempio le pale di una turbina) è quello di ricorrere a sistemi telemetrici commerciali ad esempio 'Datatel' o 'Manner'.

Il loro principio di funzionamento si basa su un modulo o antenna trasmittente rotante sulla quale sono saldamente connessi a 'pins' speciali, i cavi della sensoristica quali estensimetri e termocoppie, la quale viene alimentata in maniera induttiva e da un modulo ricevente (costituito da una antenna ricevente e da un'elettronica di demodulazione e amplificazione del segnale) che fornisce in output segnali analogici o digitali pronti per essere acquisiti.

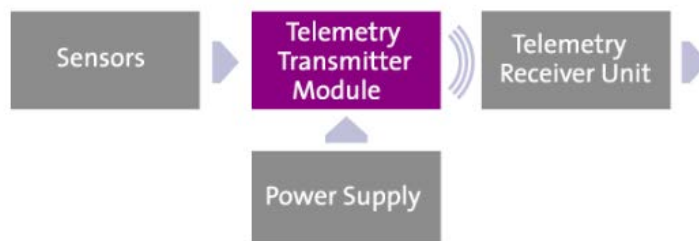


Figura 67 – Schema a blocchi di un sensore basato su telemetria.