

2023



IBERO

De:
Planeta Formación y Universidades

Fisiopatología de la disfonía por tensión muscular: ingeniería aplicada a la producción vocal

Carlos Alberto Calvache Mora

Facultad Ciencias de la Salud
Corporación Universitaria
Iberoamericana



Fisiopatología de la disfonía por tensión muscular: ingeniería aplicada a la producción
vocal

Muscle tension dysphonia pathophysiology: engineering applied to vocal production

Carlos Alberto Calvache Mora

Diciembre de 2023

Resumen

Este programa de investigación, enfocado en la caracterización de la Disfonía por Tensión Muscular (DTM), se estructura en tres proyectos esenciales: (1) *Revisión Sistemática de la Literatura*: Investigación que analiza la interacción entre el uso y la demanda vocal y los trastornos de la voz, destacando la influencia del esfuerzo vocal y la fatiga en la evaluación clínica de la DTM. (2) *Desarrollo del Modelo Numérico (A-TBCM)*: Adaptación de un modelo asimétrico triangular body-cover, perteneciente al grupo de investigación VPLAB del AC3E. Este trabajo se realizó en el marco de una pasantía de investigación, permitiendo la colaboración interdisciplinaria en la exploración de la asimetría vocal y la activación desequilibrada de los músculos laríngeos intrínsecos, esencial para entender la DTM. (3) *Validación Experimental del Modelo*: Validación experimental del modelo utilizando datos del VPLAB de la Universidad Técnica Federico Santa María. Los resultados aportan una visión detallada de la relación entre la activación muscular y la dinámica de las cuerdas vocales en la DTM. Este programa establece vínculos significativos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), enfocándose en la salud y el bienestar. La publicación de los resultados en revistas científicas de alto impacto está prevista, destacando la importancia de este trabajo en la comunidad científica internacional.

Palabras Clave: Disfonía por tensión muscular, Voz, Producción vocal

Abstract

This research program, aimed at characterizing Muscle Tension Dysphonia (MTD), is structured into three core projects: (1) *Systematic Literature Review*: Explores the relationship between voice use, vocal demand, and voice disorders, emphasizing the impact of vocal effort and fatigue in the clinical assessment of MTD. (2) *Numerical Model Development (a-TBCM)*: Involves adapting an asymmetric triangular body-cover model, developed in collaboration with the VPLAB group of AC3E. This project was part of a research internship, enabling interdisciplinary collaboration to explore vocal asymmetry and unbalanced activation of intrinsic laryngeal muscles, crucial for understanding MTD. (3) *Experimental Model Validation*: Conducts experimental validation of the model using data from VPLAB at the Universidad Técnica Federico Santa María. The results provide a detailed understanding of the relationship between muscle activation and vocal fold dynamics in MTD. The program establishes significant connections with the Sustainable Development Goals (SDGs), focusing on health and well-being. Publication of the findings in high-impact scientific journals is anticipated, highlighting the importance of this work in the international scientific community.

Key Words: Muscle tension dysphonia, Voice, Vocal production

Tabla de Contenido

Introducción	6
Problema	8
Objetivo General	10
Objetivos Específicos	10
Capítulo 1 - Fundamentación conceptual y teórica	11
Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo	13
2.1 Tipo y Diseño de Investigación	13
2.2 Consideraciones Éticas	16
2.6 Alcances y limitaciones	16
Capítulo 3 - Resultados	18
3.1 Proyecto 1	18
3.2 Proyecto 2	19
3.3 Proyecto 3	21
Capítulo 4 - Conclusiones	24
4.1 Cumplimiento de objetivos del proyecto	24
4.2 Aportes a líneas de investigación de grupo y a los ODS	25
4.3 Producción asociada al proyecto	26
Referencias	27

Introducción

La producción de voz integra los procesos fisiológicos de respiración, fonación y resonancia, dentro de los cuales es posible analizar fenómenos físicos aerodinámicos, mecánicos y acústicos (Story, 2015; Titze, 2008; Z. Zhang, 2020). En términos generales la producción del sonido es un proceso complejo no lineal que comprende la interacción aire-estructura-sonido: debido a la presión pulmonar (presión subglótica), se genera un flujo de aire que interactúa con la glotis, espacio donde se contactan los pliegues vocales para vibrar como consecuencia de la interacción del aire con los tejidos y la mucosa que los recubre (Hunter et al., 2004; Story, 2002). El flujo de aire cumple un papel fundamental en la calidad de producción del sonido (Alipour et al., 2011), el comportamiento del flujo de aire en interacción con los pliegues vocales en condiciones fisiológicas y geométricas adecuadas produce un efecto de auto oscilación cordal (David A. Berry et al., 2006; Delebecque et al., 2016; Lodermeier et al., 2018; Z. Zhang, 2016).

Desde la clínica se evidencian diferentes alteraciones en la voz, como consecuencia de deficiencias funcionales y/o estructurales en tal interacción flujo-estructura-acústica mencionada. Estas deficiencias producen variaciones en las cualidades vocales de tono, intensidad o timbre y se denominan clínicamente como disfonías. Cuando existe alta demanda vocal en una persona es común encontrar características fisiológicas de hiperfunción vocal (HV), entendida como la *"excesiva actividad musculoesquelética perilaríngea"* durante la fonación, considerada un componente etiológico en los denominados profesionales de la voz o personas que utilizan su voz a un nivel ocupacional (R. E. Hillman et al., 1989). Todos los pacientes con HV pueden experimentar una variedad de síntomas crónicos en su voz, que pueden incluir una actividad excesiva de los músculos perilaríngeos durante la fonación, diversos grados de disfonía y/o limitaciones vocales, fatiga vocal y/o mayor esfuerzo vocal (Hunter et al., 2020; Solomon, 2008).

Robert E. Hillman et al., 2020 postulan que existen dos tipos primarios de HV, fundamentalmente diferentes en términos de fisiopatología fonatoria: la HV fonotraumática (HVF) y la HV no fonotraumática (HVNF), esta última considerada desde la clínica como un factor importante para el diagnóstico de Disfonía por Tensión Muscular (DTM), objeto central del presente programa de investigación. Es importante mencionar que, los mecanismos fisiopatológicos (biomecánicos) asociados con las dos formas de VH son diferentes. Dichos mecanismos fisiopatológicos, pueden ser evidenciados desde fenómenos físicos aerodinámicos y acústicos en la voz.

Específicamente, para la HVNF como factor determinante en el diagnóstico de DTM, se han reportado mecanismos fisiopatológicos específicos como: función fonatoria anormal e ineficaz; aumento en la Presión Subglótica (PSUB) sin aumento del *Maximum Flow Declination Rate* (MFDR) (parámetro para cuantificar la aceleración de los pliegues vocales durante la fonación) (Cortes et al., 2018; Espinoza et al., 2020; Galindo et al., 2017; Robert E. Hillman et al., 2020). Bajo esa perspectiva, la DTM tendría un potencial reducido de causar trauma al tejido de las cuerdas vocales, razón por la cual no se evidencian cambios fonotraumáticos en el tejido vocal y la diferencia de otro tipo de patologías vocales que sí lo generan, como por ejemplo los nódulos vocales.

Entender el comportamiento fisiopatológico de la DTM ha sido un reto importante en la última década y se ha convertido en objeto de estudio interdisciplinar entre clínicos de la voz e ingenieros. La información sobre el impacto de la DTM en el uso diario de la voz es fundamental en su diagnóstico y tratamiento (Mehta et al., 2019). Sin embargo, evaluar todos los parámetros fisiológicos aerodinámicos, y biomecánicos de la producción vocal, se convierte en un problema de alta complejidad, debido a que clínicamente, serían necesarios procedimientos invasivos no permitidos para el estudio humano. Es por ello que, desde la ingeniería se han direccionado investigaciones en este campo de estudio, para comprender los diferentes fenómenos físicos de la producción vocal a través del modelado biomecánico (Calvache et al., 2021). Los modelos desarrollados tienen diferentes niveles de sofisticación, encontrando en la literatura modelos que representan los tejidos del pliegue vocal con elementos agrupados, con solucionadores acústicos de onda plana y flujo unidimensional (D A Berry, 2001; Ishizaka & Flanagan, 1972; Isshiki & Ishizaka, 1976; Jiang et al., 2001; Sidlof et al., 2008; Story & Titze, 1995; Svacek & Horacek, 2012; Tao & Jiang, 2009) y también modelos de mayor complejidad con una representación de la dinámica de fluidos computacional y de elementos finitos de alta fidelidad (Freixes et al., 2019; Jones et al., 2015; Palaparthi et al., 2014; Schwarz et al., 2016; Šidlof et al., 2015; Y. Zhang et al., 2020).

El fin último del modelado en la producción vocal no ha sido solamente entender el comportamiento cinemático de los pliegues vocales; también a través del reconocimiento de parámetros relacionados con los desplazamientos y la geometría del pliegue vocal, en relación con el comportamiento aerodinámico, se han podido establecer elementos sustanciales para el diagnóstico clínico de patologías vocales. Existen parámetros fisiológicos y biomecánicos actualmente imposibles de medir clínicamente,

pero que quizá puedan estimarse a través de modelos numéricos que proporcionan una serie de señales y datos sincrónicos (Hadwin et al., 2016).

La mayoría de modelos numéricos han intentado cerrar la brecha entre el modelado de producción vocal y la utilidad clínica, sin embargo, este es un cometido de mucha dificultad, principalmente porque las medidas utilizadas en la voz y las propiedades mecánicas estructurales de los modelos, se basan principalmente de experimentos in vivo, ex vivo (Doellinger et al., 2016; Luegmair et al., 2015; Vahabzadeh-Hagh et al., 2018), o simulaciones numéricas (Sadeghi et al., 2019; Šidlof et al., 2015; Svacek & Horacek, 2012) que permiten de momento un acercamiento, pero aún con falta de precisión a la realidad clínica de un paciente con alteración vocal.

Problema de investigación

Es necesario aún explorar y afinar más detalles desde las mediciones acústicas y aerodinámicas, que permitan al clínico un monitoreo clínico y seguimiento terapéutico, específicamente en patologías vocales que presentan desequilibrio en la activación muscular, como lo es la DTM. Los estudios en este campo están orientados principalmente al desarrollo de tecnología, estrategias y métodos que permitan la estimación de parámetros, sin embargo, existe una brecha en el trabajo interdisciplinar entre la Ingeniería y la Fonoaudiología para aterrizar en la aplicación clínica que permita la caracterización de este tipo de patologías desde parámetros cuantificables.

El reconocimiento y caracterización de la DTM a partir de medidas aerodinámicas como la presión subglótica, desde la clínica se convierte en uno de los principales retos, ya que ayuda a determinar o cuantificar de manera objetiva el nivel de carga vocal en pacientes con alteraciones funcionales de la voz y a diferenciarlos de otro tipo de patologías hiperfuncionales que sí producen fonotrauma y daño en el tejido de los pliegues vocales (R E Hillman et al., 1989; Van Stan et al., 2021). A su vez, la presión subglótica permite el reconocimiento de otras características mecánicas de la producción vocal, como lo son las fuerzas de colisión de los pliegues vocales.

A la fecha, es aún muy limitado el conocimiento que relaciona estas medidas con las reglas de activación muscular intrínseca de la laringe, aspecto esencial para comprender el comportamiento de estos casos y que se convierte en el punto esencial para caracterizar las patologías vocales hiperfuncionales no fonotraumáticas como factor base de las DTM. Así, llegando a la especificidad y *core* principal de este programa de investigación, existe un elemento biomecánico particular que permite la caracterización fisiopatológica de

pacientes con DTM, y que por dificultad en la exploración clínica (invasiva), no ha podido ser determinado como: la asimetría de los pliegues vocales durante la fonación.

La biomecánica de la fonación con la consideración de asimetría de los pliegues vocales, no solamente trae consigo una alteración mecánica y aerodinámica del proceso vocal, sino que podría determinarse desde parámetros geométricos y relacionados con los desplazamientos, la velocidad y la aceleración de los pliegues vocales, fenómenos que pudieran estudiarse desde el modelado numérico, a partir del establecimiento de funciones matemáticas que permitan explorar la fisiopatología de la DTM, desde parámetros imposibles de medir en pacientes reales. Este hasta hoy es un reto, teniendo en cuenta como se demostró en el estado del arte, que la mayoría de modelos han sido estructurados desde una perspectiva simétrica de los pliegues vocales y desde consideraciones de normalidad, no desde la patología o alteración de la voz.

Ello genera hoy la necesidad de explorar y adaptar un modelo biomecánico que represente tal asimetría y que contemple la activación independiente de los músculos laríngeos intrínsecos y las reglas para controlar modelos de bajo orden, a fin de hacer fácil la simulación y representación y caracterización fisiopatológica de la DTM. Este es un reto bastante importante para la clínica de la voz teniendo en cuenta que el modelado abre la posibilidad de cuantificar parámetros imposibles de explorar con instrumentos médicos convencionales.

Este proceso tiene gran complejidad y permite pensar en el presente programa de investigación, que tenga como punto de partida la identificación y definición de variables a modelar (p.ej. presión subglótica, flujo transglótico, área de los pliegues vocales, fuerzas de las masas, aceleración, entre otros), con la determinación de coeficientes matemáticos identificados en la realidad anatomofisiológica de la laringe, hasta llegar a la construcción del modelo, desde algoritmos para el procesamiento de señales y técnicas de afinación paramétrica, que permitan finalmente validarlo con la realidad clínica de la DTM.

Bajo ese marco, el problema central de este programa se consolida en la siguiente pregunta:

¿Cómo caracterizar la DTM, a través de un modelo matemático de producción vocal que contemple parámetros fisiopatológicos aerodinámicos y mecánicos, desde la activación independiente de los músculos intrínsecos de la laringe, las reglas para controlar modelos de bajo orden y la asimetría de los pliegues vocales?

Objetivo General:

Caracterizar la DTM desde parámetros fisiopatológicos aerodinámicos y mecánicos obtenidos a través de un modelo matemático de producción vocal validado

Objetivos Específicos:

1. Determinar los signos clínicos fisiopatológicos de la producción vocal en una DTM.
2. Construir un modelo numérico de bajo orden que represente los fenómenos físicos, mecánicos y aerodinámicos de la producción vocal en una DTM.
3. Validar mediante simulación el modelo matemático construido, utilizando medidas fisiopatológicas asociadas al diagnóstico de DTM

Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica

- a. Se ha demostrado que el modelado numérico es una herramienta útil para la investigación de la producción de voz normal y patológica (Alipour et al., 2000; Jones et al., 2015; Titze et al., 1995). Han sido creados modelos para: explicar las características modales de vibración de los pliegues vocales (Alipour et al., 2000; D A Berry et al., 1994); simular interacciones no lineales entre flujo-estructura-sonido (Erath et al., 2011; Titze, 2008); comprender la colisión entre los pliegues vocales (Gunter, 2004; Horacek et al., 2009; Horáček et al., 2007); entre otros que pueden ser revisados la revisión sistemática de la literatura publicada por Calvache et al. 2021.

- b. Zaňartu et al. 2014 simuló las características clínicas de la HV reportadas por Hillman et al. 1989, específicamente representó a través de un modelo de glotis triangular, el aumento compensatorio en la presión del aire pulmonar para recuperar el nivel de sonoridad vocal que se produce por la interacción con la región glotal posterior (no vibratoria). El modelo afirma el aumento en la amplitud vibratoria y en el MFDR, signos típicos de una HV. Más adelante (Galindo et al., 2017) reportaron una evolución del modelo de elementos agrupados de bajo orden, *Triangular Body-Cover Model (TBCM)*, demostrando la compensación (aumento de la presión pulmonar y activación de los músculos laríngeos) de lo que se ha descrito como una condición de inicio de VH, esto es representado fisiológicamente por un gap de la glotis posterior que se extiende hacia la glotis membranosa, lo cual conduce a fuerzas de colisión de los pliegues vocales, lo cual a su vez se ve reflejado en las medidas aerodinámicas.

- c. La última aproximación de TBCM de este mismo grupo de investigación propone un esquema fisiológico para controlar las propiedades mecánicas mediante la activación independiente de los músculos laríngeos intrínsecos. El enfoque se basa correlacionar los resultados de TBCM con reglas para controlar modelos de bajo orden y la postura de cuerdas vocales. El esquema proporciona una forma flexible y fisiológicamente relevante de controlar el modelo de producción de voz totalmente interactivo autosostenido tanto para vocales sostenidas como para gestos glotales variables en el tiempo. Al mismo tiempo, el modelo resultante permite explorar el papel de los pares de músculos antagonicos en la fonación, específicamente se hace el primer intento por simular una HVNF.

- d. Es poco probable que ocurra un fonotrauma si el cierre de las cuerdas vocales es menos completo o abrupto de lo normal (David A. Berry 2001; Gunter 2004; R. E. Hillman et al. 1989). Esto puede correlacionarse con un fenómeno aún no profundizado a nivel de la geometría del pliegue vocal: la asimetría de los pliegues vocales en la DTM.

- e. Los resultados preliminares ilustran que la combinación de simulaciones numéricas y herramientas de aprendizaje automático permite la estimación no invasiva de la presión subglótica en el habla con un rendimiento similar a estudios anteriores reportados por (Hadwin et al., 2016).

Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

El programa está compuesto por tres proyectos y será ejecutado bajo el diseño D, como se muestra a continuación:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1er proyecto					2do proyecto							3er proyecto												

Títulos de los Proyectos contenidos en el programa:

1. Características fisiopatológicas de la Disfonía por Tensión Muscular: Revisión Sistemática de la Literatura
2. Modelo numérico para la representación de la producción vocal en una Disfonía por Tensión Muscular
3. Validación de un modelo matemático para la representación de la producción vocal en una Disfonía por Tensión Muscular

El primer proyecto, correspondiente a la primera fase tiene como marco el siguiente proceso metodológico:

Título	Características fisiopatológicas de la Disfonía por Tensión Muscular: Revisión Sistemática de la Literatura
Pregunta o problema de investigación	¿Cuáles son las características fisiopatológicas de la Disfonía por Tensión Muscular reportadas en la literatura?
Objetivo General	Describir las características fisiopatológicas de la Disfonía por Tensión Muscular a través de una revisión sistemática de la literatura
Objetivos Específicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar la literatura relacionada con Disfonía por Tensión Muscular indexada en bases de datos con impacto científico. 2. Sistematizar la literatura encontrada a partir categorías semánticas, redes de co-ocurrencia y relevancia.

	<ol style="list-style-type: none"> 3. Reconocer las características bibliométricas de la literatura encontrada. 4. Hacer un meta-análisis de la literatura encontrada en la revisión.
Tipo de Estudio	Cualitativo: Revisión Sistemática de la Literatura, con metodología <i>PRISMA Statement</i>
Duración en meses	5 meses

El segundo proyecto, correspondiente a la segunda fase, y tiene como marco el siguiente proceso metodológico:

Título	Modelo numérico para la representación de la producción vocal en una Disfonía por Tensión Muscular (DTM)
Pregunta o problema de investigación	¿Cuáles son los fenómenos físicos y los componentes matemáticos de un modelo numérico de bajo orden, que represente la producción vocal en una DTM?
Objetivo General	Construir un modelo numérico de bajo orden que represente los fenómenos físicos mecánicos y aerodinámicos de la producción vocal en una DTM.
Objetivos Específicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definir las entradas y salidas del modelo a partir de las características fisiopatológicas de la DTM. 2. Determinar las funciones y las expresiones matemáticas que permitan representar la producción vocal en una DTM. 3. Establecer los coeficientes, parámetros y variables necesarias para la simulación del modelo. 4. Simular el modelo numérico a partir de diferentes gestos vocálicos y parámetros 5. Afinar el modelo matemático a través de una síntesis paramétrica basada en métodos heurísticos de estimación.
Tipo de Estudio	Cuantitativo: modelado numérico
Duración en meses	5 meses

El tercer proyecto, correspondiente a la tercera fase, y tiene como marco el siguiente proceso metodológico:

Título	Validación de un modelo matemático para la representación de la producción vocal en una Disfonía por Tensión Muscular (DTM)
Pregunta o problema de investigación	¿Cuál es la validez de un modelo matemático que representa la producción vocal en una Disfonía por Tensión Muscular (DTM)?
Objetivo General	Validar el modelo matemático construido a través de la simulación y contrastación con medidas clínicas fisiopatológicas aerodinámicas, biomecánicas y acústicas que caractericen la DTM.
Objetivos Específicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrastar los parámetros del modelo matemático de producción vocal con un <i>dataset</i> de medidas aerodinámicas de la voz, asociadas a DTM. 2. Contrastar los parámetros del modelo matemático de producción vocal con un <i>dataset</i> de medidas biomecánicas de la voz, asociadas a DTM. 3. Contrastar los parámetros del modelo matemático de producción vocal con un <i>dataset</i> de medidas acústicas de la voz asociadas a DTM. 4. Validar estadísticamente los parámetros del modelo matemático de producción vocal
Tipo de Estudio	<p>Cuantitativo: Validación de un modelo</p> <p>La validación del modelo matemático de producción vocal constará una contrastación y comparación de los parámetros del modelo con <i>data sets</i> de parámetros aerodinámicos, biomecánicos y acústicos asociados a DTM: se contempla la aplicación de pruebas estadísticas y de varianza para contrastar los parámetros del modelo para su validación. El estadístico se seleccionará de acuerdo con el número de muestras de la data set y las variables del modelo. Dentro de esta fase también se realiza una revisión y corrección del modelo: se determinarán índices de error a través de</p>

	medidas numéricas de las discrepancias entre la respuesta del modelo y los datos experimentales recogidos.
--	--

2.2 Consideraciones Éticas

Realizar un trabajo investigativo con las características metodológicas mencionadas, y en el que se busca como objetivo la revisión de literatura, la construcción de un modelo matemático y su validación, hacen que este programa se contemple Sin Riesgo. No se contempla un trabajo experimental con población. Por lo tanto, el estudio se considera Sin riesgo, de acuerdo con los principios de la Ley 83 de Ética Médica, en la Resolución 8430 de 1993, del Ministerio de Salud, y del Proyecto de Ley 156, aún en curso. Aun así, no existen pruebas clínicas, este proyecto también tiene en cuenta la Declaración Universal sobre bioética y DDHH, donde se establece la importancia de respetar plenamente la dignidad humana, los derechos humanos y las libertades fundamentales, así como los intereses y el bienestar de la persona con respecto al interés exclusivo de la ciencia o la sociedad, teniendo en cuenta que el objeto de estudio de este programa trata la voz humana.

Este estudio trabaja únicamente con muestras que hacen parte de los dataset mencionados. El uso de bases de datos, valores numéricos y simulaciones computarizadas es netamente parte de un proceso investigativo para validar un modelo matemático, la cual se realiza a través de análisis numéricos con datos de bases de datos ya recogidas y que permiten contrastar los parámetros y variables determinadas en la investigación. Los datos de contrastación del modelo son muestras recolectadas con anterioridad, en los proyectos relacionados en la sección de metodología de cada uno de los proyectos que compone este programa de investigación.

Las particularidades en las consideraciones éticas son mencionadas en la descripción de cada uno de los proyectos que compone este programa.

2.3 Alcances y limitaciones

Alcance del proyecto 1: Estado del arte en el campo señalado.

En el marco del proyecto 1, también se buscan además los siguientes impactos subsecuentes:

- Generación de nuevo conocimiento que aporta a la solución del problema identificado en el campo de la fisiopatología vocal.

- Nuevas redes académicas con pares en el campo de la ingeniería, la Vocología y la laringología.
- Consolidación de una base de conocimiento para un sector de aplicación
- Consolidación de la línea de investigación en el campo de la Vocología, desde el grupo de investigación DDCHI, del programa de Fonoaudiología, con otros grupos de investigación estratégicos interdisciplinarios, que permitirán nuevos proyectos y productos en alianza.
- Desarrollo de nuevos usos potenciales para investigaciones ya existentes en el laboratorio de voz, perteneciente al programa de Fonoaudiología Ibero.

Alcance del proyecto 2: Código del modelo; Modelo construido que permita la simulación de la producción vocal en la DTM, con diferentes parámetros de entrada y que permita graficar el comportamiento de las características fisiopatológicas determinadas.

En el marco del proyecto 2, también se buscan además los siguientes impactos subsecuentes:

- Generación de nuevo conocimiento que aporta a la solución del problema identificado en el campo de la fisiopatología vocal.
- Nuevas redes académicas con pares en el campo de la ingeniería, la Vocología y la laringología.
- Consolidación de una base de conocimiento para un sector de aplicación
- Consolidación de la línea de investigación en el campo de la Vocología, desde el grupo de investigación DDCHI, del programa de Fonoaudiología, con otros grupos de investigación estratégicos interdisciplinarios, que permitirán nuevos proyectos y productos en alianza.
- Desarrollo de nuevos usos potenciales para investigaciones ya existentes en el laboratorio de voz, perteneciente al programa de Fonoaudiología Ibero.

Capítulo 3 – Resultados

3.1 Proyecto 1

El Proyecto 1, relacionado con la Revisión Sistemática de la Literatura, abordó un aspecto crucial en el ámbito de las patologías vocales, particularmente la disfonía por tensión muscular (DTM). Este proyecto, detallado en la publicación de Calvache Mora CA et al. en "*Folia Phoniátrica et Logopaédica*", ha contribuido significativamente a la comprensión de la relación entre el uso y la demanda vocal y los problemas de voz, un enfoque clave en el objetivo general de caracterizar la DTM desde una perspectiva fisiopatológica aerodinámica y mecánica.

Entre los hallazgos más relevantes, se destacó la fuerte asociación entre el esfuerzo vocal y problemas de voz, subrayando la influencia directa de la carga vocal y las prácticas de uso de la voz en la aparición y el manejo de trastornos vocales. Esta conexión es fundamental para la caracterización y el tratamiento efectivo de la DTM, alineándose con los objetivos específicos del programa de investigación. Además, se observó una relación significativa entre la fatiga vocal y parámetros acústicos específicos como el shimmer y el CPP, lo que resalta la importancia de estos indicadores en la evaluación clínica de la fatiga y el estrés vocal, aspectos críticos en el diagnóstico de la DTM.

Otro punto de interés fue la alta calidad de los estudios analizados en la revisión sistemática, con aproximadamente el 64.29% de ellos alcanzando altas puntuaciones en la evaluación de calidad. Este dato refuerza la fiabilidad y validez de los hallazgos presentados, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones clínicas en el campo de las patologías vocales. Además, el análisis de contenido basado en la carga vocal ayudó a consolidar un marco conceptual integral, enriqueciendo la comprensión del impacto de la carga vocal en la DTM y su tratamiento.

Los resultados de este primer proyecto no solo refuerzan la comprensión de la carga vocal y su impacto en la DTM, sino que también establecen una base para futuras investigaciones y prácticas clínicas. La generalización de los resultados, respaldada por la alta proporción de estudios basados en evaluaciones instrumentales estandarizadas, subraya la relevancia y aplicabilidad de estos hallazgos en el campo de la fisiopatología vocal, en línea con los objetivos generales y específicos del programa de investigación.

Publicación: Calvache Mora CA, Cantor-Cutiva LC, Hunter EJ, Guzman M, Solaque L. Systematic Review of Literature on Vocal Demand Response: Understanding Physiology, Measurements, and Associated Factors. Folia Phoniatr Logop. 2023 Jul 1. doi: 10.1159/000531678. Epub ahead of print. PMID: 37393892.

3.2 Proyecto 2

En el marco del objetivo general del programa, que busca caracterizar la Disfonía por Tensión Muscular (DTM) desde una perspectiva fisiopatológica aerodinámica y mecánica, el Proyecto 2 ha realizado un avance significativo mediante el desarrollo del modelo asimétrico triangular body-cover (a-TBCM). Este modelo representa un hito importante en la comprensión de la asimetría vocal, particularmente en la activación desequilibrada de los músculos laríngeos intrínsecos, un aspecto crucial en la patología de la DTM.

El a-TBCM se ha destacado por su capacidad para explorar cómo los desequilibrios en la activación muscular afectan las propiedades geométricas y viscoelásticas de los pliegues vocales, lo que tiene un impacto directo en las oscilaciones de estos y en la aerodinámica del flujo glótico. La incorporación de un factor de asimetría "q" ha permitido simular una variedad de escenarios de desequilibrios musculares, proporcionando un entendimiento más profundo de los trastornos vocales caracterizados por asimetrías significativas, como la parálisis unilateral y la DTM.

Además, el modelo ha demostrado su capacidad para replicar las oscilaciones de los pliegues vocales en casos patológicos, revelando desequilibrios musculares que se alinean con las características observadas en pacientes con estas condiciones. Por ejemplo, se ha observado que la parálisis unilateral presenta asimetrías superiores al 30%, mientras que en casos de DTM, las asimetrías suelen estar por debajo del 5%.

Este enfoque innovador no solo enriquece la comprensión de la fisiopatología de la DTM, sino que también abre caminos hacia el desarrollo de estrategias diagnósticas y terapéuticas más precisas y efectivas. Al proporcionar un modelo detallado que relaciona la activación muscular desequilibrada con las alteraciones en la oscilación de los pliegues vocales, el a-TBCM se alinea estrechamente con los objetivos del programa, enfatizando

la importancia de la biomecánica vocal en la investigación y tratamiento de patologías vocales como la DTM.

El Proyecto 2, a través del modelo a-TBCM, ha proporcionado una herramienta valiosa para investigar y caracterizar la complejidad de las patologías vocales, especialmente la DTM, contribuyendo así a la generación de conocimientos significativos en el campo de la fisiopatología vocal y reforzando el enfoque interdisciplinario del programa. El desarrollo del modelo a-TBCM es un logro que no solo resalta la innovación en el campo de la fisiopatología vocal, sino también la importancia de la colaboración interdisciplinaria en la investigación científica.

Es importante destacar que, este modelo fue desarrollado en conjunto con el grupo de investigación VPLAB de la Universidad Técnica Federico Santa María, en Valparaíso, Chile, un equipo líder en el estudio de la biomecánica vocal, donde el autor de este informe, tuvo la oportunidad de realizar una pasantía de investigación. También participó la facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, desde el proyecto de doctorado del investigador principal de este proyecto. Esta colaboración ha sido fundamental para fusionar la experiencia en ingeniería con la aplicación clínica en la fisiopatología vocal, creando un puente entre dos campos que tradicionalmente han operado de manera independiente. La sinergia entre el equipo de este programa y VPLAB ha permitido que el modelo a-TBCM evolucione y se adapte a las necesidades específicas de la investigación en disfonía por tensión muscular. Es importante destacar que la adaptación del modelo y todos los derechos del modelo base pertenecen al grupo VPLAB. Esta colaboración continua refleja un compromiso compartido para avanzar en el conocimiento y tratamiento de las patologías vocales, y subraya el valor de las asociaciones interdisciplinarias en la investigación científica.

El Proyecto 2 dentro de este programa de investigación, en colaboración con VPLAB, no solo ha enriquecido el entendimiento de la DTM, sino que también ha establecido una base sólida para futuras investigaciones. Esta colaboración continúa actualmente, enfocándose en explorar nuevas fronteras en la intersección de la ingeniería y la fisiopatología vocal, buscando siempre traducir los avances científicos en aplicaciones clínicas que beneficien a los pacientes con trastornos vocales.

Finalmente, es importante mencionar que el detalle completo de estos resultados, reflejando el trabajo colaborativo y los avances significativos realizados en el modelo a-TBCM, se encuentra meticulosamente documentado en el artículo científico inicialmente titulado "*Modeling impaired vocal vibrations through an asymmetric triangular body-cover model of the vocal folds*". Este artículo representa una compilación exhaustiva de los hallazgos y análisis realizados, ofreciendo una visión integral del modelo. Este artículo científico, está próximo a ser sometido a una revista indexada Q1. La elección de una revista de este calibre refleja el nivel de rigor y la calidad de la investigación llevada a cabo, así como la importancia que se otorga a la diseminación de estos hallazgos en la comunidad científica. La publicación en una revista Q1 no solo proporcionará una plataforma para compartir los avances con otros expertos en el campo, sino que también reforzará la relevancia de este trabajo en el ámbito internacional, contribuyendo significativamente al campo de la fisiopatología vocal y la ingeniería aplicada.

3.3 Proyecto 3

El Proyecto 3 se enfoca en la validación experimental y la caracterización de las características fisiopatológicas de DTM, mediante el uso del modelo asimétrico de triángulo cuerpo-cubierta (a-TBCM). La investigación incluyó a 10 participantes con NPVH, evaluados integralmente por un laringólogo y un patólogo del habla y del lenguaje, incluyendo videostroboscopia laríngea, mediciones aerodinámicas y análisis acústico de la función vocal.

Los datos experimentales se recogieron en un entorno controlado y silencioso, utilizando procedimientos específicos para medir el flujo de aire oral y la presión intraoral, así como grabaciones endoscópicas de vídeo de alta velocidad (HSV) para capturar los patrones de vibración de las cuerdas vocales. Se utilizaron métodos avanzados de procesamiento de señales y técnicas de generación de kymogramas para analizar las imágenes HSV. Los datos fueron obtenidos del Voice Production Lab (VPLAB) de la Universidad Técnica Federico Santa María, reflejando la colaboración interdisciplinaria con colaboradores del Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering (AC3E) en Valparaíso, Chile. Esta sinergia interinstitucional ha sido fundamental para abordar con éxito la complejidad de la hiperfunción vocal no

fonotraumática (NPVH) y su representación mediante el modelo asimétrico de triángulo cuerpo-cubierta (a-TBCM).

Los resultados del estudio revelaron tendencias significativas en la asimetría de amplitud y fase para dos tipologías estudiadas, relacionadas con diferentes grados de desequilibrio muscular. Se estableció una clara relación entre el desequilibrio y la asimetría, con variaciones más pronunciadas en la tipología II en comparación con la tipología I. Además, se analizaron las tendencias en la geometría de oscilación, específicamente el cociente de apertura (Open Quotient, OQ) y la frecuencia fundamental (f_0), encontrando diferencias notables entre las tipologías en función de la activación muscular.

La comparación con datos clínicos de sujetos con NPVH mostró que las asimetrías de fase y amplitud calculadas a partir de kymogramas digitales coincidían con los espacios de asimetría descritos para cada tipología en el estudio. Se seleccionaron tres sujetos para un análisis más detallado de las asimetrías y posturas, utilizando imágenes laríngeas HSV y kymogramas sintéticos y reales. Este análisis permitió definir la tipología de cada sujeto en función de las medidas de asimetría y los ángulos de los aritenoides.

Los resultados proporcionan una comprensión detallada de la relación entre los patrones de activación muscular y la dinámica de las cuerdas vocales en NPVH. La organización sistemática de los datos de simulación, considerando los parámetros de asimetría para las distintas tipologías, ha permitido entender las variaciones en las características biomecánicas y aerodinámicas asociadas con diferentes grados de desequilibrio muscular. Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de las características fisiopatológicas de la DTM, sentando las bases para mejorar los enfoques diagnósticos y terapéuticos en el ámbito de los trastornos de la voz.

Todos los detalles de este proceso, incluyendo los métodos experimentales y los resultados obtenidos, se presentarán próximamente en un artículo tentativamente titulado "Non-Phonotraumatic Vocal Hyperfunction Typologies Represented Using A Numerical Model Of Laryngeal Intrinsic Muscle Activation", que está en proceso de ser sometido para su publicación. Este trabajo representa un avance importante en la

investigación de trastornos de la voz y demuestra el potencial de las colaboraciones interdisciplinarias en el ámbito de la ingeniería biomédica y la fonoaudiología.

Capítulo 4 – Conclusiones

4.1 Cumplimiento de objetivos del proyecto

Del Proyecto 1:

- El Proyecto 1, con su enfoque en la Revisión Sistemática de la Literatura, ha establecido una comprensión más profunda de la relación entre el uso y la demanda vocal y los problemas de voz, particularmente en el contexto de la disfonía por tensión muscular (DTM).
- Se ha identificado una fuerte asociación entre el esfuerzo vocal y los problemas de voz, resaltando la influencia directa de la carga vocal y las prácticas de uso de la voz en la aparición y el manejo de trastornos vocales.
- La relación significativa entre la fatiga vocal y parámetros acústicos específicos como el shimmer y el CPP destaca la importancia de estos indicadores en la evaluación clínica de la fatiga y el estrés vocal, aspectos cruciales en el diagnóstico de la DTM.
- La alta calidad de los estudios analizados en la revisión sistemática refuerza la fiabilidad y validez de los hallazgos, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones clínicas en el campo de las patologías vocales.

Del Proyecto 2:

- El desarrollo del modelo asimétrico triangular body-cover (a-TBCM) en el Proyecto 2 ha representado un avance significativo en la comprensión de la asimetría vocal y la activación desequilibrada de los músculos laríngeos intrínsecos.
- El a-TBCM ha demostrado ser una herramienta valiosa para explorar cómo los desequilibrios en la activación muscular afectan las propiedades geométricas y viscoelásticas de los pliegues vocales, impactando directamente en las oscilaciones y en la aerodinámica del flujo glótico.
- Este enfoque ha enriquecido la comprensión de la fisiopatología de la DTM y ha abierto caminos hacia el desarrollo de estrategias diagnósticas y terapéuticas más precisas y efectivas.

Del Proyecto 3:

- La validación experimental y la caracterización de las características fisiopatológicas de la DTM a través del modelo a-TBCM han proporcionado una comprensión detallada de la relación entre los patrones de activación muscular y la dinámica de las cuerdas vocales en NPVH.
- Los resultados han subrayado la importancia de las variaciones en las características biomecánicas y aerodinámicas asociadas con diferentes grados de desequilibrio muscular en la comprensión de la DTM.
- La comparación con datos clínicos de sujetos con NPVH ha demostrado la capacidad del modelo para replicar escenarios reales, resaltando su potencial para aplicaciones clínicas.

Conclusiones Generales:

- Este programa de investigación ha contribuido significativamente a la generación de conocimientos en el campo de la fisiopatología vocal, especialmente en la comprensión y tratamiento de la disfonía por tensión muscular.
- La colaboración interdisciplinaria, particularmente con el VPLAB de la Universidad Técnica Federico Santa María y el AC3E en Valparaíso, Chile, ha sido fundamental en el logro de estos avances, demostrando la importancia de la sinergia entre diferentes disciplinas.
- Los resultados obtenidos establecen una base sólida para futuras investigaciones y prácticas clínicas en el campo de los trastornos de la voz, alineándose con los objetivos generales y específicos del programa.

4.2 Aportes a líneas de investigación de grupo y a los ODS

El presente programa le apunta a la generación y transferencia del conocimiento con impacto científico internacional, específicamente en el marco del ODS 3: reforzar la capacidad de todos los países, en particular los países en desarrollo, en materia de alerta temprana, reducción de riesgos y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial. Así mismo, aporta en el ODS 17, alianzas para lograr objetivos, considerando el trabajo interdisciplinario con ingenieros. Esta es una apuesta a la interdisciplinaria entre científicos desde las ciencias de la salud y las ciencias aplicadas con el fin de cumplir con objetivos de desarrollo sostenible para Colombia, específicamente, los relacionados con

bienestar, salud, industria, innovación e infraestructura; además que involucra alianzas interinstitucionales para lograr objetivos encaminados al desarrollo de ciencia, tecnología e innovación.

4.3 Producción asociada al proyecto

- Vocal Demand Response: Physiology, measurements, and associated factors reported in the literature. PUBLICADO, *Folia Phoniatica et Logopaedica* (Q1)
- Fine-tuning of a voice production model to estimate impact stress using a metaheuristic method. PUBLICADO. RIICS, *Revista de Investigación en Innovación en Ciencias de la Salud* (Q4)
- Vocal Geometry APP: dimensions and mechanical parameters of vocal folds, based on rules for controlling intralaryngeal muscle activations. *SOMETIDO*: RIICS, *Revista de Investigación en Innovación en Ciencias de la Salud* (Q4)

Referencias

- Alipour, F., Berry, D. A., & Titze, I. R. (2000). A finite-element model of vocal-fold vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *108*(6), 3003–3012. <https://doi.org/10.1121/1.1324678>
- Alipour, F., Brücker, C., Cook, D. D., Gömmel, A., Kaltenbacher, M., Mattheus, W., Mongeau, L., Nauman, E., Schwarze, R., Tokuda, I., & Zörner, S. (2011). *Mathematical Models and Numerical Schemes for the Simulation of Human Phonation*. *43*(0), 323–343.
- Alzamendi, G. A., Peterson, S. D., Erath, B. D., Hillman, R. E., & Zañartu, M. (2022). Triangular body-cover model of the vocal folds with coordinated activation of the five intrinsic laryngeal muscles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *151*(1), 17–30. <https://doi.org/10.1121/10.0009169>
- Berry, D. A. (2001). Mechanisms of modal and nonmodal phonation. *JOURNAL OF PHONETICS*, *29*(4), 431–450. <https://doi.org/10.1006/jpho.2001.0148>
- Berry, D. A., Herzel, H., Titze, I. R., & Krischer, K. (1994). Interpretation of biomechanical simulations of normal and chaotic vocal fold oscillations with empirical eigenfunctions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *95*(6), 3595–3604. <https://doi.org/10.1121/1.409875>
- Berry, David A., Zhang, Z., Neubauer, J., & Lofqvist, A. (2006). Mechanisms of irregular vibration in a physical model of the vocal folds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *120*(3), EL36–EL42. <https://doi.org/10.1121/1.2234519>
- Calvache, C., Solaque, L., Velasco, A., & Peñuela, L. (2021). Biomechanical Models to Represent Vocal Physiology: A Systematic Review. *Journal of Voice*. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.02.014>
- Cortes, J. P., Espinoza, V. M., Ghassemi, M., Mehta, D. D., Van Stan, J. H., Hillman, R. E., Guttag, V. J., & Zañartu, M. (2018). Ambulatory assessment of phonotraumatic vocal hyperfunction using glottal airflow measures estimated from neck-surface acceleration. *PLOS ONE*, *13*(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209017>
- Delebecque, L., Pelorson, X., & Beautemps, D. (2016). Modeling of aerodynamic interaction between vocal folds and vocal tract during production of a vowel–voiceless plosive–vowel sequence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *139*(1), 350–360. <https://doi.org/10.1121/1.4939115>
- Doellinger, M., Berry, D. A., & Kniesburges, S. (2016). Dynamic vocal fold parameters with changing adduction in ex-vivo hemilarynx experiments. *JOURNAL OF THE*

- ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 139(5), 2372–2385.
<https://doi.org/10.1121/1.4947044>
- Erath, B. D., Zanartu, M., Peterson, S. D., & Plesniak, M. W. (2011). Nonlinear vocal fold dynamics resulting from asymmetric fluid loading on a two-mass model of speech. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 21(3), 33113. <https://doi.org/10.1063/1.3615726>
- Espinoza, V. M., Mehta, D. D., Van Stan, J. H., Hillman, R. E., & Zañartu, M. (2020). Glottal aerodynamics estimated from neck-surface vibration in women with phonotraumatic and nonphonotraumatic vocal hyperfunction. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 63(9), 2861–2869. https://doi.org/10.1044/2020_JSLHR-20-00189
- Freixes, M., Arnela, M., Claudi Socoro, J., Alias, F., & Guasch, O. (2019). Glottal Source Contribution to Higher Order Modes in the Finite Element Synthesis of Vowels. *APPLIED SCIENCES-BASEL*, 9(21). <https://doi.org/10.3390/app9214535>
- Galindo, G. E., Peterson, S. D., Erath, B. D., Castro, C., Hillman, R. E., & Zañartu, M. (2017). Modeling the pathophysiology of phonotraumatic vocal hyperfunction with a triangular glottal model of the vocal folds. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(9), 2452–2471. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-S-16-0412
- Gunter, H. E. (2004). Modeling mechanical stresses as a factor in the etiology of benign vocal fold lesions. *Journal of Biomechanics*, 37(7), 1119–1124. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2003.11.007>
- Hadwin, P. J., Galindo, G. E., Daun, K. J., Zañartu, M., Erath, B. D., Cataldo, E., & Peterson, S. D. (2016). Non-stationary Bayesian estimation of parameters from a body cover model of the vocal folds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5), 2683–2696. <https://doi.org/10.1121/1.4948755>
- Hillman, R. E., Holmberg, E. B., Perkell, J. S., Walsh, M., & Vaughan, C. (1989). Objective assessment of vocal hyperfunction: An experimental framework and initial results. *Journal of Speech and Hearing Research*, 32(2), 373–392. <https://doi.org/10.1044/jshr.3202.373>
- Hillman, R. E., Holmberg, E. B., Perkell, J. S., Walsh, M., & Vaughan, C. (1989). Objective assessment of vocal hyperfunction: an experimental framework and initial results. *Journal of Speech and Hearing Research*, 32(2), 373–392. <https://doi.org/10.1044/jshr.3202.373>
- Hillman, Robert E., Stepp, C. E., Van Stan, J. H., Zañartu, M., & Mehta, D. D. (2020). An

- updated theoretical framework for vocal hyperfunction. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 29(4), 2254–2260. https://doi.org/10.1044/2020_AJSLP-20-00104
- Horacek, J., Laukkanen, A.-M., Sidlof, P., Murphy, P., & Svec, J. G. (2009). Comparison of Acceleration and Impact Stress as Possible Loading Factors in Phonation: A Computer Modeling Study. *FOLIA PHONIATRICA ET LOGOPAEDICA*, 61(3), 137–145. <https://doi.org/10.1159/000219949>
- Horáček, J., Laukkanen, A. M., & Šidlof, P. (2007). Estimation of impact stress using an aeroelastic model of voice production. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 32(4), 185–192. <https://doi.org/10.1080/14015430600628039>
- Hunter, E. J., Cantor-Cutiva, L. C., van Leer, E., van Mersbergen, M., Nanjundeswaran, C. D., Bottalico, P., Sandage, M. J., & Whitling, S. (2020). Toward a Consensus Description of Vocal Effort, Vocal Load, Vocal Loading, and Vocal Fatigue. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 63(2), 509–532. https://doi.org/10.1044/2019_JSLHR-19-00057
- Hunter, E. J., Titze, I. R., & Alipour, F. (2004). A three-dimensional model of vocal fold abduction/adduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(4), 1747–1759. <https://doi.org/10.1121/1.1652033>
- Ishizaka, K., & Flanagan, J. L. (1972). Synthesis of Voiced Sounds From a Two-Mass Model of the Vocal Cords. *Bell System Technical Journal*, 51(6), 1233–1268. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1972.tb02651.x>
- Isshiki, N., & Ishizaka, K. (1976). Computer simulation of pathological vocal-cord vibration. *Journal of the Acoustical Society of America*, 60(5), 1193–1198. <https://doi.org/10.1121/1.381221>
- Jiang, J. J., Zhang, Y., & Stern, J. (2001). Modeling of chaotic vibrations in symmetric vocal folds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(4), 2120–2128. <https://doi.org/10.1121/1.1395596>
- Jones, C. L., Achuthan, A., & Erath, B. D. (2015). Modal response of a computational vocal fold model with a substrate layer of adipose tissue. *JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 137(2), EL158–EL164. <https://doi.org/10.1121/1.4905892>
- Lodermeyer, A., Tautz, M., Becker, S., Doellinger, M., Birk, V., & Kniesburges, S. (2018). Aeroacoustic analysis of the human phonation process based on a hybrid acoustic PIV approach. *EXPERIMENTS IN FLUIDS*, 59(1). <https://doi.org/10.1007/s00348->

- Luegmair, G., Mehta, D. D., Kobler, J. B., & Doellinger, M. (2015). Three-Dimensional Optical Reconstruction of Vocal Fold Kinematics Using High-Speed Video With a Laser Projection System. *IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING*, *34*(12), 2572–2582. <https://doi.org/10.1109/TMI.2015.2445921>
- Mehta, D. D., Espinoza, V. M., Van Stan, J. H., Zaňartu, M., & Hillman, R. E. (2019). The difference between first and second harmonic amplitudes correlates between glottal airflow and neck-surface accelerometer signals during phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *145*(5), EL386–EL392. <https://doi.org/10.1121/1.5100909>
- Palaparthi, A., Riede, T., & Titze, I. R. (2014). Combining Multiobjective Optimization and Cluster Analysis to Study Vocal Fold Functional Morphology. *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, *61*(7), 2199–2208. <https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2319194>
- Sadeghi, H., Kniesburges, S., Kaltenbacher, M., Schützenberger, A., & Döllinger, M. (2019). Computational Models of Laryngeal Aerodynamics: Potentials and Numerical Costs. *Journal of Voice*, *33*(4), 385–400. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2018.01.001>
- Schwarz, R., Hüttner, B., Döllinger, M., Luegmair, G., Eysholdt, U., Schuster, M., Lohscheller, J., Gürlek, E., Vampola, T., Laukkanen, A.-M. M., Horáček, J., Švec, J. G., Chen, L.-J., Mongeau, L., Triep, M., Brücker, C., Stingl, M., Döllinger, M., Bailly, L., ... Cveticanin, L. (2016). Modeling the pathophysiology of phonotraumatic vocal hyperfunction with a triangular glottal model of the vocal folds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *139*(2), 1–16. <https://doi.org/10.1121/1.1577547>
- Sidlof, P., Svec, J. G., Horacek, J., Vesely, J., Klepacek, I., & Havlik, R. (2008). Geometry of human vocal folds and glottal channel for mathematical and biomechanical modeling of voice production. *JOURNAL OF BIOMECHANICS*, *41*(5), 985–995. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.12.016>
- Šidlof, P., Zörner, S., & Hüppe, A. (2015). A hybrid approach to the computational aeroacoustics of human voice production. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, *14*(3), 473–488. <https://doi.org/10.1007/s10237-014-0617-1>
- Solomon, N. P. (2008). Vocal fatigue and its relation to vocal hyperfunction. *International Journal of Speech-Language Pathology*, *10*(4), 254–266. <https://doi.org/10.1080/14417040701730990>

- Story, B. H. (2002). An overview of the physiology, physics and modeling of the sound source for vowels. *Acoustical Science and Technology*, 23(4), 195–206. <https://doi.org/10.1250/ast.23.195>
- Story, B. H. (2015). Mechanisms of Voice Production. In *The Handbook of Speech Production* (pp. 34–58). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118584156.ch3>
- Story, B. H., & Titze, I. R. (1995). Voice simulation with a body-cover model of the vocal folds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(2), 1249–1260. <https://doi.org/10.1121/1.412234>
- Svacek, P., & Horacek, J. (2012). Numerical Simulation of Glottal Flow in Interaction with Self Oscillating Vocal Folds: Comparison of Finite Element Approximation with a Simplified Model. *COMMUNICATIONS IN COMPUTATIONAL PHYSICS*, 12(3), 789–806. <https://doi.org/10.4208/cicp.011010.280611s>
- Tao, C., & Jiang, J. J. (2009). Effects of mucosal loading on vocal fold vibration. *CHAOS*, 19(2). <https://doi.org/10.1063/1.3120293>
- Titze, I. R. (2008). Nonlinear source–filter coupling in phonation: Theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 2733–2749. <https://doi.org/10.1121/1.2832337>
- Titze, I. R., Schmidt, S. S., & Titze, M. R. (1995). Phonation threshold pressure in a physical model of the vocal fold mucosa. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(5), 3080–3084. <https://doi.org/10.1121/1.411870>
- Vahabzadeh-Hagh, A. M., Zhang, Z., & Chhetri, D. K. (2018). Hirano’s cover-body model and its unique laryngeal postures revisited. *LARYNGOSCOPE*, 128(6), 1412–1418. <https://doi.org/10.1002/lary.27000>
- Van Stan, J. H., Ortiz, A. J., Cortes, J. P., Marks, K. L., Toles, L. E., Mehta, D. D., Burns, J. A., Hron, T., Stadelman-Cohen, T., Krusemark, C., Muise, J., Fox, A. B., Nudelman, C., Zeitels, Z., & Hillman, R. E. (2021). Differences in daily voice use measures between females patients with nonphonotraumatic vocal hyperfunction and matched controls. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 1–14.
- Zañartu, M., Galindo, G. E., Erath, B. D., Peterson, S. D., Wodicka, G. R., & Hillman, R. E. (2014). Modeling the effects of a posterior glottal opening on vocal fold dynamics with implications for vocal hyperfunction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(6), 3262–3271. <https://doi.org/10.1121/1.4901714>

- Zhang, Y., Zheng, X., & Xue, Q. (2020). A Deep Neural Network Based Glottal Flow Model for Predicting Fluid-Structure Interactions during Voice Production. *Applied Sciences*, *10*(2), 705. <https://doi.org/10.3390/app10020705>
- Zhang, Z. (2016). Mechanics of human voice production and control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *140*(4), 2614–2635. <https://doi.org/10.1121/1.4964509>
- Zhang, Z. (2020). Estimation of vocal fold physiology from voice acoustics using machine learning. *JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, *147*(3), EL264–EL270. <https://doi.org/10.1121/10.0000927>