

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRANSPORTE DE OZÔNIO EM HIDROGERADOR DE 311 MVA: MODELAGEM
FLUIDODINÂMICA TRIDIMENSIONAL DE MÁQUINA ELÉTRICA ATRAVÉS DO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

DM 09/2024

GUSTAVO GASPAR GIROTTO

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO GASPAR GIROTTO

TRANSPORTE DE OZÔNIO EM HIDROGERADOR DE 311 MVA: MODELAGEM
FLUIDODINÂMICA TRIDIMENSIONAL DE MÁQUINA ELÉTRICA ATRAVÉS DO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

DM 09/2024

Dissertação de mestrado
submetida à Banca Examinadora
para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

G526t Girotto, Gustavo Gaspar.
Transporte de ozônio em hidrogerador de 311 MVA:
modelagem fluidodinâmica tridimensional de máquina elétrica
através do método dos elementos finitos / Gustavo Gaspar Girotto.
— 2024.
82 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Melo E Silva de Oliveira
Coorientador(a): Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2024.

1. Descargas parciais. 2. Ozônio. 3. Fluidodinâmica
computacional. 4. Hidrogerador. 5. Elementos finitos. I.
Título.

CDD 620.00151825

“TRANSPORTE DE OZÔNIO EM HIDROGERADOR DE 311 MVA: MODELAGEM FLUIDODINÂMICA TRIDIMENSIONAL DE MÁQUINA ELÉTRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS”

AUTOR: GUSTAVO GASPAR GIROTTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 29/02/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira
(Orientador – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev
(Coorientador – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa
(Avaliador Interno – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Ronaldo de Freitas Zampolo
(Coorientador – FCT/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Licínio Dimitri Sá de Alcântara
(Avaliador Externo – UFRA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Agradecimentos

Aos meus pais, que me educaram e me guiaram para eu me tornar a pessoa que sou hoje em dia.

Aos meu avós que mesmo passando por uma situação complicada, não deixam transparecer e continuam me apoiando.

Ao professor Rodrigo Oliveira que me guiou e orientou durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Victor Dmitriev por sua liderança, ideias e sugestões ao longo do projeto de P&D com a CPFL, o qual só foi possível graças a ele.

Ao professor Licinius Alcantara pela sua grande contribuição nos cálculos e definições das condições de contorno do problema.

Ao Nathan Lopes pela sua ajuda na revisão teórica deste trabalho e modelagem e validação da estrutura dos radiadores utilizada no trabalho.

Esta dissertação é resultado de pesquisa realizada em equipe, que culminou no artigo científico " [1] DE OLIVEIRA, R. M. S.; GIROTTO, G. G. ; ALCANTARA, L. D. S. ; LOPES, N. M. ; DMITRIEV, VICTOR , 'Ozone Transport in 311 MVA Hydrogenerator: Computational Fluid Dynamics Modelling of Three-Dimensional Electric Machine', *Energies*, v. 16, p. 1-35, 2023."

À Raissa Oliveira que sempre me faz continuar em frente e me faz me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus amigos João Lucas, Maria Letícia, Lucas Spinosa e Luiz Filipe, que mesmo não conversando todos os dias, tornam a vida mais leve.

À CPFL e ao CNPQ por me agraciarem com uma bolsa de estudos: CPFL até o mês de setembro de 2022 e CNPQ a partir de outubro de 2022.

“O medo não é malvado. Ele te mostra qual é a sua franqueza. E quando você conhece a sua franqueza, então pode se tornar mais forte e mais gentil.”

Clive, Gildarts - Fairy Tail.

Resumo

Neste trabalho, é desenvolvido um modelo numérico tridimensional de fluidodinâmica para uma única unidade geradora de 311 MVA de uma usina hidrelétrica, utilizando o método dos elementos finitos. O objetivo é estudar e compreender os mecanismos de transporte de ozônio dentro da estrutura da máquina elétrica geradora fechada. O ozônio é produzido por descargas parciais relacionadas a falhas nas barras estatóricas. Para analisar o transporte de ozônio a partir de fontes localizadas, é desenvolvido e apresentado pela primeira vez um modelo fluidodinâmico tridimensional de um hidrogerador em operação. O modelo possui um alto nível de detalhes geométricos. Além disso, uma nova proposta para simplificar a modelagem de radiadores é implementada e validada. A estrutura modelada é baseada em uma máquina elétrica do hidrogerador de Campos Novos e consiste em 378 barras estatóricas do tipo bobina feitas de cobre revestido por mica e, mais externamente, por uma camada de revestimento semicondutor. Outras partes também são representadas, incluindo o núcleo estatórico e direcionadores de ar feitos de aço inoxidável, radiadores de cobre, o rotor com sua superfície de epóxi, e o piso e paredes externas de concreto. No modelo de dinâmica de fluidos, uma malha de elementos finitos foi projetada para representar as regiões de ar dentro do hidrogerador e as superfícies dos materiais que reagem com o ozônio (com suas respectivas taxas de reação), onde o fluxo de ar e o transporte de ozônio são modelados usando as equações de Navier-Stokes e a lei de conservação de massa. As fontes de descargas parciais são representadas por fontes de ozônio com formas prismáticas, posicionadas nas superfícies das barras estatóricas. As concentrações de ozônio foram calculadas dentro e ao redor da máquina geradora. O raio do rotor é de 3,8075 m e sua frequência de rotação é de 200 RPM. A velocidade do ar radial devido à ventilação interpolar também é considerada (2,2 m/s, conforme verificado experimentalmente no local). A velocidade radial nas proximidades dos radiadores é de 3 m/s. Concluiu-se que o perfil de transporte de ozônio é influenciado pela posição da fonte nas barras estatóricas, de modo que determinar a localização da fonte é possível e depende da determinação das áreas de concentração máxima locais e globais de ozônio nos radiadores.

Palavras-chave: descargas parciais, ozônio, fluidodinâmica computacional, transporte de gases, hidrogerador, elementos finitos, diagnóstico.

Abstract

In this work, a three-dimensional numerical model of fluid dynamics is developed for a single 311 MVA power generator unit in a hydroelectric power plant using the finite element method. The goal is to study the ozone transport mechanisms within the enclosed structure of the electrical generator machine. Ozone is produced by partial discharges related to some faults in the stationary bars. To analyze the ozone transport from localized sources, a three-dimensional fluid dynamics model of an operational hydrogenerator is developed and presented for the first time. The model has a high level of geometric details. Additionally, a new proposal to simplify the modeling of radiators is implemented and validated. The modeled structure is based on an electrical machine from the Campos Novos hydrogenerator and consists of 378 coil-type stationary bars made of mica-coated copper and, externally, by a layer of semiconductor coating. Other parts are also represented, including the stationary core and air deflectors made of stainless steel, copper radiators, the rotor with its epoxy surface, and the floor and external walls made of concrete. In the fluid dynamics model, a finite element mesh is designed to represent the air regions inside the hydrogenerator and the surfaces of materials reacting with ozone (with their respective reaction rates), where air flow and ozone transport are modeled using the Navier-Stokes equations and the law of mass conservation. Partial discharge sources are represented by ozone sources with prismatic shapes, positioned on the surfaces of stationary bars. Ozone concentrations are calculated inside and around the generator machine. The rotor radius is 3.8075 m, and its rotation frequency is 200 RPM. The radial air velocity due to interpolar ventilation is also considered (2.2 m/s, as experimentally verified on-site). The radial velocity near the radiators is 3 m/s. It is concluded that the ozone transport profile is influenced by the source position on the stationary bars, so determining the source location is possible and depends on determining the local and global maximum ozone concentration areas on the radiators.

Key-words: partial discharges, ozone, computational fluid dynamics, gas transport, hidrogenator, finite elements, diagnosis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Principais estruturas elétricas de um hidrogerador: (a) parte do estator, (b) rotor e (c) estrutura contendo estator e rotor.	20
Figura 2 – Estruturas do núcleo estatórico.	21
Figura 3 – Modelos de barras Roebel: (a) barra do tipo ondulada e (b) barra do tipo imbricada.	22
Figura 4 – Ligação das bobinas de acordo com o tipo de barras Roebel: (a) ondulada e (b) imbricada.	23
Figura 5 – Bobina de múltiplas espiras.	23
Figura 6 – Corte de uma ranhura com bobina de múltiplas espiras.	23
Figura 7 – Tipos de isolamento em (a) bobinas de múltiplas espiras e em (b) barras Roebel.	24
Figura 8 – Probabilidades respectivas dos fatores que levam a danos no isolamento.	27
Figura 9 – Visão geral do modelo de elementos finitos do hidrogerador: rotulação das partes estruturais. A altura w_h e largura w_l da parede são fornecidas.	34
Figura 10 – Barras estatóricas do hidrogerador e suas dimensões: (a) modelo da barra tipo bobina e (b) todas as 378 barras estatóricas dispostas no modelo do hidrogerador. As dimensões b_w e b_h são fornecidas.	35
Figura 11 – Núcleo estatórico do hidrogerador e suas dimensões: (a) vista em perspectiva e (b) vista superior. As dimensões $c_h, c_t, c_s, c_r, c_R, t_l, g_l, t_h$ e g_h são fornecidas.	36
Figura 12 – Direcionadores de ar e radiador do hidrogerador: (a) vista em perspectiva e (b) vista superior. As dimensões d_l, r_l, r_h e d_r são fornecidas.	37
Figura 13 – Posicionamento das fontes (e seus rótulos) nas barras estatóricas do hidrogerador.	40
Figura 14 – Visão geral da malha de elementos finitos concebida para representar a estrutura do hidrogerador. As regiões amareladas são os direcionadores de ar.	42
Figura 15 – Parte da malha computacional concebida para representar as fontes de ozônio (destacadas em azul) e as barras estatóricas.	43
Figura 16 – Transmissões de ozônio através de modelos numéricos de radiadores em função da velocidade do ar: modelos de chapas de cobre e tela.	45
Figura 17 – Vistas em perspectiva das distribuições de concentração de ozônio (ppb) em simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.	46

Figura 18 – Magnitude do campo de velocidade (m/s) no plano yz nas simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.	47
Figura 19 – Concentrações de ozônio (ppb) no plano yz nas simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.	48
Figura 20 – Concentrações de ozônio (ppb) no plano xz nas simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.	48
Figura 21 – Rótulos de cada radiador do hidrogerador e ângulos de referência: (a) vista em perspectiva e (b) vista superior. Os radiadores são apresentados em tons de azul.	50
Figura 22 – Visão geral da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador para as simulações (a) A e (b) B (com a fonte S_{11} adicionalmente ativada).	51
Figura 23 – Visão geral da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) C (fonte S_9 adicionalmente ativada) e (b) D (fonte S_1 adicionalmente ativada).	52
Figura 24 – Visão superior da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) A e (b) B (fonte S_{11} adicionalmente ativada).	53
Figura 25 – Visão superior da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) C (S_9 adicionalmente ativada) e (b) D (S_1 adicionalmente ativada).	54
Figura 26 – Visão geral da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador para a simulação D (incluindo o campo de velocidade vetorial com tamanhos de vetor em escala logarítmica).	55
Figura 27 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade no plano vertical perpendicular às fontes S_5 e S_6 (simulação D, $\phi = 315^\circ$).	55
Figura 28 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade no plano vertical perpendicular ao radiador R_3 (simulação D, $\phi = 337,5^\circ$).	56
Figura 29 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade no plano horizontal perpendicular à fonte S_5 (simulação D, $z = 2,070$ m).	56
Figura 30 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade em um plano horizontal na região superior do hidrogerador (simulação D, $z = 3,750$ m).	57
Figura 31 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_1 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.	57

Figura 32 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_2 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D. . .	58
Figura 33 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_3 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D. . .	58
Figura 34 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_4 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D. . .	59
Figura 35 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_5 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D. . .	59
Figura 36 – Influência das fontes S_{13} a S_{17} nas simulações (a) E e (b) F.	66
Figura 37 – Influência localizada na região das fontes S_{18} e S_{19} na simulação: (a) E e (b) F.	67
Figura 38 – Influência localizada na região das fontes S_{20} e S_{21} na simulação: (a) E e (b) F.	68
Figura 39 – Visão em perspectiva da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) E e (b) F.	69
Figura 40 – Visão superior da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador na simulação: (a) E e (b) F.	70
Figura 41 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_1 e R_2 no modelo numérico do hidrogerador: (a) R_1 (simulação E), (b) R_1 (simulação F), (c) R_2 (simulação E) e (d) R_2 (simulação F).	71
Figura 42 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_3 e R_4 no modelo numérico do hidrogerador: (a) R_3 (simulação E), (b) R_3 (simulação F), (c) R_4 (simulação E) e (d) R_4 (simulação F).	71
Figura 43 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_5 e R_6 no modelo numérico do hidrogerador: (a) R_5 (simulação E), (b) R_5 (simulação F), (c) R_6 (simulação E) e (d) R_6 (simulação F).	72
Figura 44 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_7 e R_8 no modelo numérico do hidrogerador: (a) R_7 (simulação E), (b) R_7 (simulação F), (c) R_8 (simulação E) e (d) R_8 (simulação F).	72
Figura 45 – Concentrações máximas de ozônio nos radiadores em função de ϕ (modelo numérico).	74

Lista de tabelas

Tabela 1	– Valores de γ adotados para diferentes materiais no modelo numérico.	32
Tabela 2	– Os componentes e partes estruturais representados do hidrogerador, materiais e detalhes geométricos.	33
Tabela 3	– Localizações das fontes de ozônio nas simulações A a D: coordenadas verticais e angulares, categoria de altura e setores.	41
Tabela 4	– Volume e concentração volumétrica média de ozônio para cada fonte (simulações A a D).	41
Tabela 5	– Comparação de tempo de processamento e memória utilizada entre os modelos do radiador.	45
Tabela 6	– Concentrações de ozônio (ppb) no corredor de circulação de pessoal e na superfície dos radiadores para cada simulação (de A a D).	61
Tabela 7	– Diferenças percentuais entre as concentrações máximas de ozônio entre as simulações.	62
Tabela 8	– Diferenças percentuais entre as concentrações médias espaciais de ozônio entre as simulações.	62
Tabela 9	– Localização de cada fonte de ozônio nas simulações E e F, sua classe de altura e setor.	64
Tabela 10	– Volume e concentração média volumétrica de ozônio para cada fonte nas simulações E e F.	65
Tabela 11	– Concentração máxima de ozônio em cada radiador.	74

Lista de abreviaturas e siglas

DPs	Descargas Parciais
PRPD	Descarga parcial resolvida em fase
PDA	Análise de descarga parcial
CFD	Dinâmica de fluidos computacional

Lista de símbolos

c	Concentração molar da espécie (mol/m ³)
\vec{J}	Campo vetorial de fluxo de difusão (mol/m ² ·s)
\vec{u}_m	Campo vetorial de velocidade média da espécie (m/s)
R	Taxa molar de produção da espécie por unidade de volume (mol/m ³ ·s)
D	Coefficiente de difusão (m ² /s)
η	Rendimento de ozônio (g/kWh)
P	Potência das descargas (kW)
m	Massa molar do ozônio (g/mol)
V_{O_3}	Volume da região onde o ozônio é gerado (m ³)
J_s	Fluxo líquido de deposição de ozônio em superfícies (m/s)
γ	Coefficiente de acomodação de massa (adimensional)
C	Concentração de ozônio (mol/m ³)
l	Caminho livre molecular médio (m)
$\langle v \rangle$	Velocidade de Boltzmann para o ozônio (m/s)
R_G	Constante de Boltzmann (J/K·mol)
T	Temperatura (K)
w_l	Largura das paredes externas do hidrogerador (m)
w_h	Altura das paredes externas do hidrogerador (m)
b_h	Altura das barras estáticas (m)
b_w	comprimento das barras estáticas (mm)
c_r	Raio menor do núcleo do estator (m)
c_R	Raio maior do núcleo do estator (m)
c_t	Espessura dos grupos de lâminas do núcleo do estator (mm)
c_s	Espaçamento entre grupos de lâminas no núcleo magnético (mm)
g_l	Largura das ranhuras do estator (mm)
g_h	Altura das ranhuras do estator (mm)
t_l	Largura dos dentes do estator (mm)
t_h	Altura dos dentes do estator (mm)
d_l	Comprimento das arestas laterais dos direcionadores de ar (m)
d_r	Raio das arestas externas dos direcionadores de ar (m)

d_h	Altura dos direcionadores de ar (m)
R_h	Altura do rotor (m)
R_r	Raio do rotor (m)
r_l	Largura dos radiadores (m)
r_h	Altura dos radiadores (m)
σ_s	Solidez da tela (adimensional)
d	Diâmetro dos fios que formam a tela (mm)
p	Pressão (Pa)
K	Coefficiente de resistência (adimensional)
ρ	Densidade do fluido (kg/m^3)
u	Velocidade do fluido (m/s)
ν	Viscosidade do fluido (m^2/s)
\vec{n}	Vetor normal a superfície de contorno (adimensional)
N_c	Variação do fluxo total na superfície de contorno (adimensional)
S_i	i -ésima fonte de ozônio
R_i	i -ésimo radiador

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Introdução Geral	17
2	REVISÃO TEÓRICA	20
2.1	Estruturas de hidrogeradores	20
2.1.1	Núcleo do estator	21
2.1.2	Enrolamento do estator	22
2.1.3	Tipos de isolamento	24
2.2	Descargas parciais em hidrogeradores e produção de ozônio	25
2.2.1	Descargas parciais	25
2.2.2	Descargas parciais e produção de ozônio	27
2.3	Fluidodinâmica Computacional - Equações Gerais	29
2.4	Lei da conservação de massa aplicada para o ozônio	31
2.5	Parâmetros da dinâmica dos fluidos de ozônio	31
3	MODELO NUMÉRICO DO HIDROGERADOR	33
3.1	Geometria e materiais	33
3.2	Condições de contorno	37
3.3	Malha de elementos finitos e recursos computacionais	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Modelo de tela equivalente do radiador	44
4.2	Fluidodinâmica e distribuição de ozônio em modelo tridimensional completo de hidrogerador	49
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	77

1 Introdução

1.1 Introdução Geral

Descargas parciais (DPs) referem-se a pequenas descargas elétricas que ocorrem em máquinas elétricas de alta voltagem devido a problemas com os materiais de isolamento ou revestimentos semicondutores [1–3]. O monitoramento de DP depende de técnicas que possibilitam a identificação de problemas nessas máquinas, contribuindo para a manutenção preventiva e preditiva. De acordo com [4], existem quatro tipos de DP que podem ocorrer em equipamentos elétricos de alta voltagem: descargas internas, descargas em fendas, descargas nas extremidades das bobinas e arcos e faíscas.

As descargas parciais geram ozônio por meio de reações eletroquímicas que envolvem elétrons da descarga e oxigênio do ar [5]. A detecção de ozônio proveniente de equipamentos de alta voltagem pode servir como indicador da presença de descargas parciais, que podem estar associadas a problemas de isolamento e, mais frequentemente, a descargas superficiais. O ozônio produzido durante eventos intensos de descargas parciais pode deteriorar quimicamente tanto o isolamento quanto o núcleo, contribuindo para o envelhecimento dos componentes do hidrogerador [6–8]. Conseqüentemente, o monitoramento de ozônio surgiu como um procedimento preventivo que foi amplamente estudado e desenvolvido, especialmente ao longo das últimas três décadas.

O monitoramento e a detecção de ozônio em hidrogeradores são vitais para proteger o equipamento, garantir a segurança operacional e possibilitar o desenvolvimento de procedimentos de manutenção preditiva. Vários estudos foram realizados nesse campo de conhecimento, com avanços significativos na detecção de ozônio [9–17].

Em [9], são detalhados procedimentos práticos para medir as concentrações de ozônio e suas taxas de geração em barras estáticas de hidrogeradores. Além disso, em [10], são explorados vários métodos de diagnóstico para identificar descargas parciais em um motor gerador fortemente carregado. O estudo revelou uma correlação entre os níveis de ozônio, tensão e carga, indicando possíveis defeitos dielétricos.

No artigo [11], são apresentados mapas de descarga parcial resolvida em fase (PRPD) obtidos online e medições de ozônio na usina hidrelétrica Peace Canyon da BC Hydro. Uma representação gráfica ilustra a concentração de ozônio ao redor de 360 graus de uma unidade do

hidrogerador, com sensores posicionados nas seções superior e inferior de cada refrigerador.

Nos artigos [12, 13], foi conduzido um experimento de laboratório para investigar a distribuição e comportamento do ozônio nas proximidades do enrolamento do estator e dentro do núcleo do gerador. Posteriormente, medições de ozônio foram realizadas na barragem de Shipsaw, com sensores colocados nos radiadores das unidades geradoras, e na usina hidrelétrica Isle-Maligne, com sensores posicionados em aberturas na carcaça externa. O mapeamento do ozônio ao redor dos geradores foi relatado, e em um caso, foi possível identificar a fonte de atividade localizada de descargas parciais.

No artigo [14], foi realizado um estudo para reduzir a concentração elevada de ozônio detectada dentro de hidrogeradores a um nível seguro para os trabalhadores (menos de 100 ppb). A pesquisa revelou que a concentração de ozônio em hidrogeradores é influenciada pelo ajuste das venezianas e pelo modo de ventilação da usina elétrica.

No artigo [15], é apresentado um aplicativo de software diagnóstico para geradores hidrelétricos chamado MIDA versão 1.984. Este aplicativo inclui módulos que fornecem informações como medições PRPD, Análise de Descarga Parcial (PDA) e mapeamento da concentração de ozônio ao redor dos geradores, entre outras características.

No artigo [16], são identificados os mecanismos responsáveis por desencadear descargas parciais em geradores hidrelétricos. São discutidos vários métodos de detecção de DPs, incluindo o monitoramento de ozônio. Observa-se que, no caso de máquinas ventiladas abertas, os sensores de ozônio são geralmente posicionados nos radiadores. No entanto, para motores e geradores totalmente fechados, é feito um furo na carcaça da máquina em um local que facilita o fluxo de ar adequado e o posicionamento do sensor. O estudo relata que as concentrações de ozônio excederam 75 ppm em alguns casos.

No artigo [17], o artigo aprofunda-se nos fatores subjacentes às descargas parciais superficiais e fornece descrições detalhadas dos métodos de detecção. Esses métodos abrangem técnicas offline, incluindo inspeções visuais locais e avaliações elétricas, bem como procedimentos online, como análise PRPD e medições de ozônio. Além disso, em [17], sugere-se que os monitores de ozônio meçam as concentrações gerais de ozônio, servindo como indicadores dos níveis coletivos de DPs resultantes de falhas nos enrolamentos.

Outro campo de conhecimento que desempenha um papel fundamental na análise de fenômenos físicos e, conseqüentemente, na redução dos custos de procedimentos experimentais e no aprimoramento da segurança operacional é o domínio da modelagem numérica de hidrogeradores. Modelos bidimensionais e tridimensionais foram desenvolvidos em várias áreas de

estudo [2, 18–23]. Esses modelos empregam o método dos elementos finitos e abrangem análises eletromagnéticas [18, 20], análises térmicas [19, 21, 22] e análises mecânicas [23]. Em [19], um modelo bidimensional de dinâmica de fluidos computacional (CFD) é incorporado ao seu modelo térmico. Até onde se sabe, atualmente não há artigos científicos que apresentem um modelo numérico abrangendo dinâmica de fluidos turbulentos para toda a estrutura tridimensional de um hidrogerador.

Neste trabalho, é desenvolvido um modelo tridimensional sem precedentes de dinâmica de fluidos para simular o transporte de ozônio a partir de fontes localizadas em uma representação completa de um hidrogerador operacional. O modelo possui um alto nível de detalhamento geométrico e inclui uma nova abordagem para reduzir os requisitos computacionais na representação dos radiadores. Esse nível de detalhamento permite observar a influência do estator e do arranjo das barras do estator no fluxo de ar e no transporte de ozônio a partir de fontes de descarga parcial. As influências de outros componentes do hidrogerador (rotor, radiadores, diretores de ar e paredes) também são observadas e analisadas. Os perfis de distribuição de ozônio obtidos fornecem informações úteis para o projeto de sistemas adequados de detecção de ozônio, usando, por exemplo, conjuntos de sensores de ozônio.

Este estudo apresenta um modelo numérico abrangente de uma unidade geradora completa na usina hidrelétrica brasileira de Campos Novos. Este modelo é projetado para investigar e elucidar o fluxo de gás dentro da estrutura fechada e as concentrações de ozônio dentro e ao redor do gerador. No Capítulo 2, é fornecida uma revisão sobre a estrutura de hidrogeradores, uma revisão teórica sobre descargas parciais e são apresentadas as equações essenciais de dinâmica de fluidos. No Capítulo 3, é apresentada a descrição do novo modelo numérico desenvolvido neste estudo. O Capítulo 4 destaca os resultados do modelo tridimensional, acompanhados por uma discussão sobre as descobertas. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

2 Revisão teórica

2.1 Estruturas de hidrogeradores

Um hidrogerador é uma máquina rotativa composta por dois componentes principais: estator e rotor [24]. O rotor é a parte giratória e é responsável por gerar o campo magnético girante enquanto que o estator, constituído por condutores (barras estatóricas) e fixos por um núcleo aterrado (núcleo estatórico), dá o caminho através das bobinas de barras estatóricas para a corrente elétrica induzida. O núcleo estatórico tem a função de concentrar o campo magnético gerado pelo rotor, dissipar o calor gerado pela corrente induzida e fixar os enrolamentos em estruturas chamadas ranhuras que fazem parte da coroa do estator. A Figura 1 mostra os componentes principais de um hidrogerador.

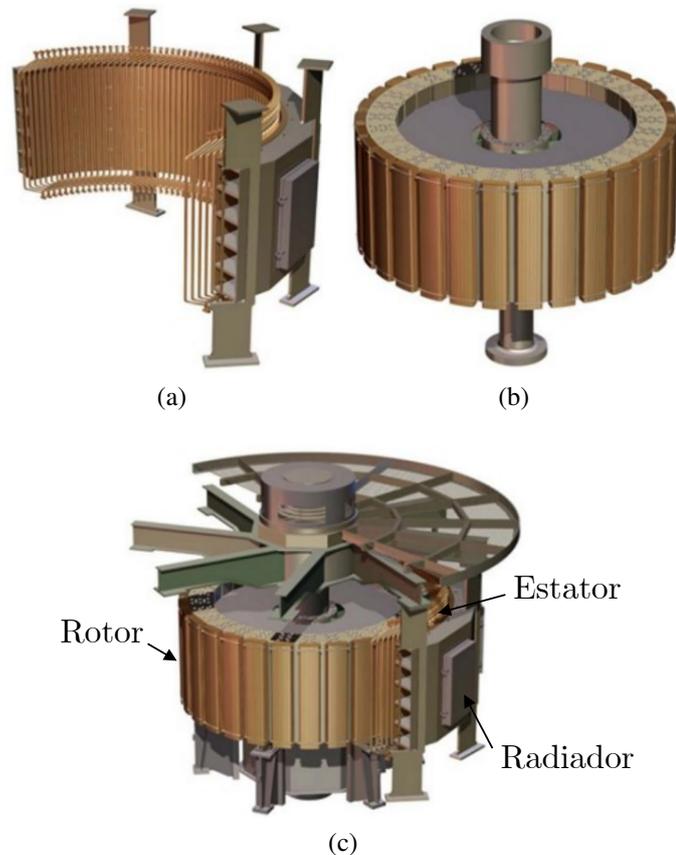


Figura 1 – Principais estruturas elétricas de um hidrogerador: (a) parte do estator, (b) rotor e (c) estrutura contendo estator e rotor. Adaptada de [25].

Como a diferença de tensão entre os enrolamentos e o núcleo do estator pode atingir valores na ordem de milhares de Volts, é de suma importância que haja a separação dessas superfícies por um material isolante adequado. Embora desempenhe um papel crucial na isolamento, suporte e dissipação de calor, o material isolante não possui qualquer função direta na geração de eletricidade [26].

2.1.1 Núcleo do estator

O núcleo é constituído por chapas de aço com uma pequena percentagem de silício e de baixo teor de carbono com espessura de 0,35 a 0,5 mm (por chapa) que são estampadas, lixadas e envernizadas para evitar curto-circuitos localizados e reduzir as perdas por correntes de Foucault [27]. O conjunto de chapas formam as seções do núcleo e essas seções são espaçadas por espaçadores para permitir o fluxo de ar pelo estator, distribuindo uniformemente a temperatura evitando falhas decorrentes da dilatação térmica.

A principal função do núcleo estático é criar um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético no estator. Além disso, ao longo da circunferência do núcleo estático há os alojamentos do enrolamento do estator que é chamado de ranhuras. A estrutura entre ranhuras é chamada de dente. Juntos, eles constituem a coroa do estator. A Figura 2 ilustra a estrutura do núcleo estático.

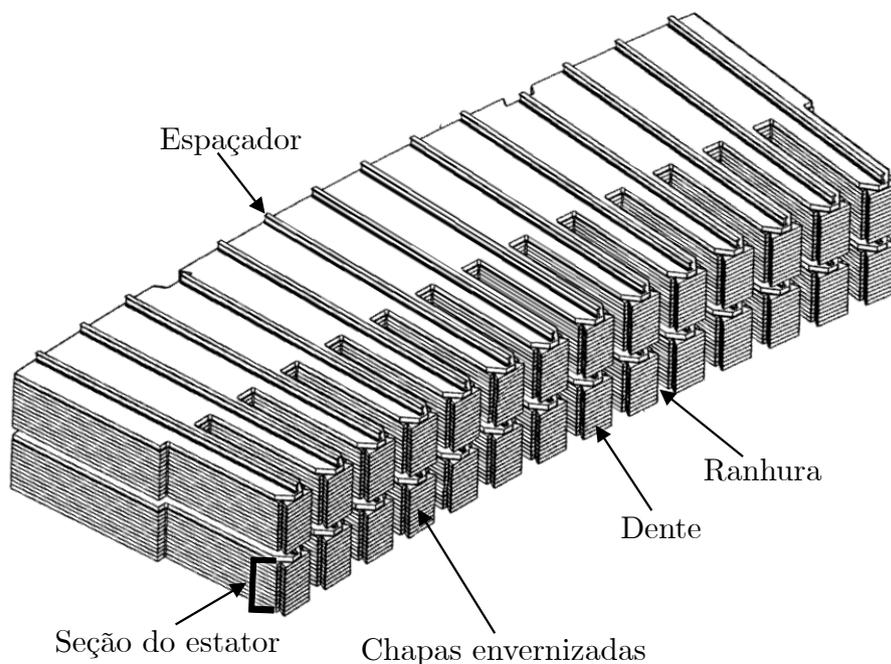


Figura 2 – Estrutura do núcleo estático. Adaptada de [27].

2.1.2 Enrolamento do estator

Existem dois modelos de bobinas amplamente utilizados nos enrolamentos do estator de máquinas elétricas: o de barras (meia bobina) e o de bobinas de múltiplas espiras. Geralmente a escolha do modelo é baseada na potência de saída da máquina: para máquinas até 75 MW, o mais comum é a utilização do tipo bobinas de múltiplas espiras e para máquinas maiores utiliza-se o tipo barras [26].

As barras (meia bobina) ou barras Roebel são formadas por diversos condutores de seção retangular sendo cada condutor isolado independentemente. Essas barras são inseridas nas ranhuras e depois conectadas à outra metade, formando a bobina completa. Existem dois tipos de barras Roebel: a ondulada e a imbricada conforme mostrado na Figura 3.

O tipo de barras que é utilizado define a forma que as bobinas são ligadas. Ao utilizar o modelo imbricado, os terminais das bobinas são ligados às barras vizinhas enquanto no modelo ondulado, os terminais são ligados às barras deslocadas de 360° elétricos (fases defasadas de 120° entre si). A ligação das bobinas de acordo com o tipo de barras é mostrada pela Figura 4.

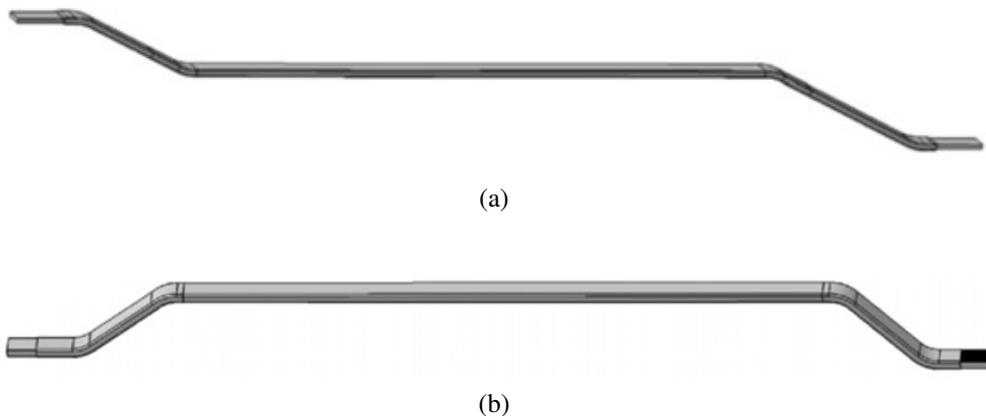


Figura 3 – Modelos de barras Roebel: (a) barra do tipo ondulada e (b) barra do tipo imbricada. Adaptada de [26].

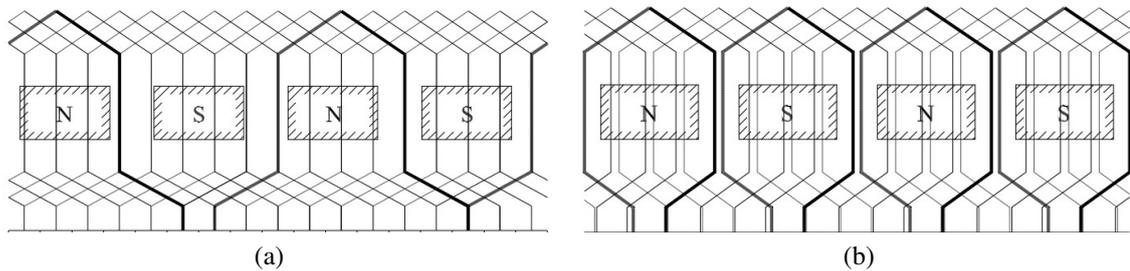


Figura 4 – Ligação das bobinas de acordo com o tipo de barras Roebel: (a) ondulada e (b) imbricada. Reproduzida de [26].

Nas bobinas de múltiplas espiras, cada espira é composta por um conjunto de condutores elementares, e é possível que cada bobina contenha mais de uma espira. A Figura 5 mostra uma bobina desse tipo. Devido à capacidade de alocar várias espiras por bobina, o projeto desses enrolamentos torna-se mais flexível, permitindo a variação do número de ranhuras e circuitos paralelos para alcançar a solução mais adequada. A Figura 6 mostra um corte transversal da estrutura mostrando as partes internas de duas barras que formam a bobina de múltiplas espiras, em que para este caso mostra um enrolamento de dupla camada formado por barras constituídas de sete espiras e cada espira constituída por quatro condutores.



Figura 5 – Bobina de múltiplas espiras. Adaptada de [26].

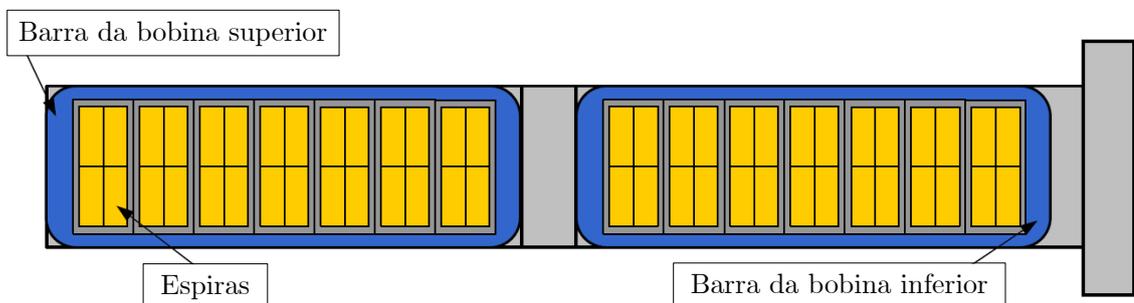


Figura 6 – Corte de uma ranhura com bobina de múltiplas espiras. Adaptada de [28].

2.1.3 Tipos de isolamento

O tipo de isolamento adotada é diferente para a bobina de múltiplas espiras e para a barra Roebel. Na bobina de múltiplas espiras existem três tipos de isolamento que são utilizadas: a isolamento dos condutores de cobre (*strand*), a isolamento das espiras (*turn*) e a isolamento externa (*groundwall*). Já na barra Roebel, como ela não possui espiras, apenas dois tipos de isolamento são utilizadas: a isolamento dos condutores de cobre e a isolamento externa. A Figura 7 mostra a isolamento para os dois tipos de bobinas.

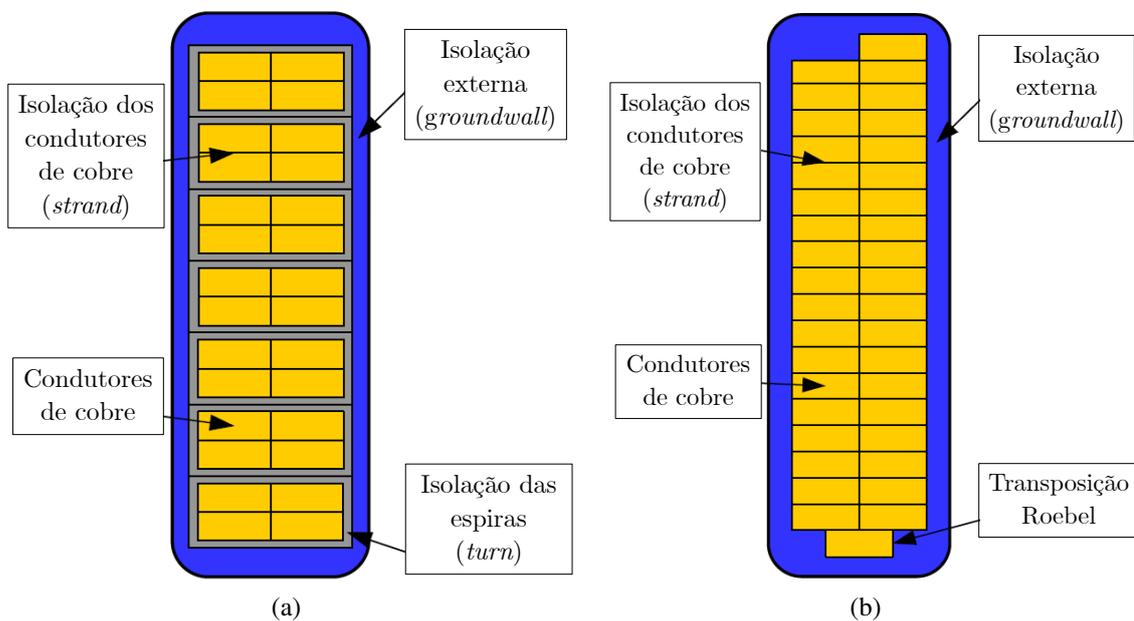


Figura 7 – Tipos de isolamento em (a) bobinas de múltiplas espiras e em (b) barras Roebel. Adaptada de [26].

Os condutores são os elementos principais de um enrolamento e, no caso de hidrogeradores, são sempre isolados. Além da isolamento dos condutores há a isolamento principal que consiste na isolamento externa da Figura 7. Essa isolamento tem a função de separar os grupos de condutores das superfícies metálicas da coroa do estator que se encontram aterradas. Os principais materiais utilizados são vidro, mica e papel para a isolamento elétrica e asfalto, poliéster e epóxi para a diminuição do estresse mecânico. Além de sua importância na isolamento elétrica, essa proteção também atua dando a devida fixação mecânica das bobinas às ranhuras, uma vez que as barras estão sob elevado estresse mecânico decorrente de vibrações mecânicas do gerador e vibrações de origem elétrica. Por fim, uma camada de tinta semi-condutiva é colocada na superfície externa da barra para que esta tenha um bom contato elétrico com a parede da ranhura, evitando assim que descargas parciais do tipo ranhura (*slot*) possam ocorrer em algum vazio entre o enrolamento

e a parede da ranhura. A tinta semi-condutiva também tem a função de minimizar o gradiente de tensão na superfície da barra, reduzindo as possibilidades de descargas do tipo corona. Caso as barras estejam mal fixadas às ranhuras, as vibrações podem danificar a tinta semi-condutiva por atrito e ocasionar problemas de descargas parciais e em casos mais sérios, o material dielétrico também pode ser danificado.

2.2 Descargas parciais em hidrogeradores e produção de ozônio

2.2.1 Descargas parciais

Descarga parcial (DP) é um fenômeno caracterizado por uma ruptura dielétrica dentro do isolamento de máquinas elétricas operando em condições de alta voltagem. As DP podem se manifestar de diversas formas, cada uma com características e consequências distintas [29, 30].

Descargas internas ocorrem devido a imperfeições no isolamento, presentes durante a fabricação ou desenvolvidas ao longo do tempo devido a tensões mecânicas, térmicas ou elétricas contínuas durante a operação da máquina [7, 29]. Essas tensões levam à formação de vazios e delaminações dentro do material dielétrico. A presença dessas falhas ainda erode e deteriora a integridade do isolamento, enfraquecendo-o e tornando-o mais suscetível a falhas. A formação de vazios e delaminações dentro do material dielétrico durante o desenvolvimento de descargas internas introduz regiões localizadas de menor resistência dielétrica. Essa região comprometida do isolamento torna-se mais suscetível ao surgimento de descargas parciais quando submetida a campos elétricos elevados. Consequentemente, as descargas internas não apenas enfraquecem o sistema de isolamento, mas também servem como precursores de eventos mais graves de ruptura elétrica. Geralmente, não estão associadas à geração de ozônio.

Descargas nas ranhuras são conhecidas como o mecanismo comum de falha no isolamento do enrolamento do estator [31] e se manifestam quando o revestimento protetor das ranhuras do estator é comprometido, geralmente como resultado de vibrações, deslocamentos e atrito associados ao movimento das barras do estator. Esse dano frequentemente inicia um processo gradual de erosão ao longo do tempo, levando à deterioração da integridade do isolamento [4, 11]. É importante destacar que o intervalo de tempo entre o início dessas descargas e a eventual falha do material de isolamento tende a ser relativamente curto. Se houver circulação de ar suficiente nas ranhuras e correntes de descarga parcial estiverem presentes, pode ocorrer a produção de ozônio, o que pode gerar ácido nítrico que contribui para o processo de falha [31]. Entre os

fatores que levam a danos no isolamento, problemas relacionados às ranhuras é de cerca de 10%, uma vez que está relacionada à frequência de solda das barras em suas posições ou na saliência devido a vibrações. Esse tipo de falha é menos frequente do que as descargas relacionadas ao envelhecimento (32%) e descargas associadas à contaminação dos enrolamentos (25%) [32].

Descargas superficiais ocorrem quando a magnitude do campo elétrico ultrapassa a resistência dielétrica do ar circundante. Essas descargas normalmente ocorrem na superfície do isolamento elétrico próximo às extremidades dos enrolamentos, geralmente iniciadas por um efeito térmico ou contaminação do revestimento protetor da extremidade do enrolamento, o que contribui para a degradação do isolamento e pode levar à falha do isolamento se não for abordado. Uma avalanche de elétrons pode se propagar ao longo da superfície do material se a fonte de tensão permanecer ligada [33]. Como as descargas parciais ocorrem no ar, há produção de ozônio [17].

Descargas causadas por partículas contaminantes ocorrem quando pequenas partículas condutivas se acumulam na superfície do isolamento. A diferente condutividade e características elétricas do contaminante causam uma alteração no campo elétrico, aumentando o estresse elétrico [34]. Esse estresse elétrico cria regiões localizadas de descargas parciais que produzem ozônio. Essas descargas desgastam gradualmente o material de isolamento, levando a pontos fracos e comprometendo a eficácia geral do sistema de isolamento. A contaminação do enrolamento é a segunda causa mais frequente de descargas parciais prejudiciais, com uma probabilidade de ocorrência de aproximadamente 25% [32].

A Figura 8 mostra os principais fatores responsáveis por danificar os sistemas de isolamento dos hidrogeradores [32]. Observe que 60% desses eventos podem ser atribuídos a descargas parciais. Aproximadamente 40% das descargas prejudiciais estão relacionadas à produção de ozônio (descargas externas, no ar).

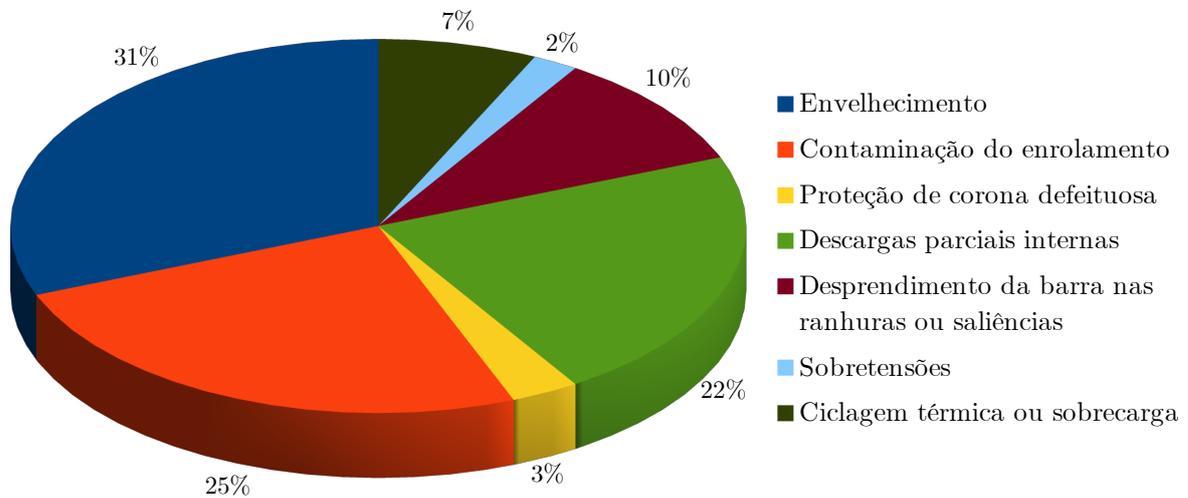


Figura 8 – Probabilidades respectivas dos fatores que levam a danos no isolamento [32].

Como evidente, a ocorrência de descargas parciais, especialmente na superfície do isolamento elétrico, resulta em colisões entre íons e elétrons e o material isolante. Essas colisões repetidas pioram as descargas em andamento e aceleram os processos prejudiciais. A integridade do material isolante é crucial para o funcionamento adequado e a longevidade das máquinas elétricas. Portanto, pode-se afirmar que a vida útil dessas máquinas muitas vezes depende da saúde e confiabilidade do isolamento. Essa deterioração pode levar a perdas econômicas significativas devido ao comprometimento do desempenho da máquina e ao aumento dos custos de manutenção e reparo. Assim, o monitoramento de ozônio pode ser visto como uma ferramenta complementar para prevenir o surgimento de eventos graves de descargas parciais. Devido ao impacto crítico no desempenho dos hidrogeradores, foram desenvolvidos e implementados métodos padronizados para a detecção de descargas parciais [35]. Pesquisas em andamento continuam explorando novas técnicas para a detecção precisa e medição de grandezas físicas associadas a essas falhas. Uma abordagem digna de nota envolve o monitoramento dos subprodutos gerados como resultado dos fenômenos de descargas parciais, como o ozônio.

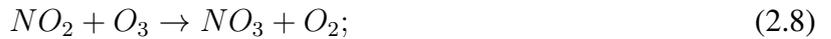
2.2.2 Descargas parciais e produção de ozônio

Dependendo da localização e dos materiais envolvidos, uma descarga parcial pode resultar em vários subprodutos químicos no ambiente do hidrogerador. Quando uma DP ocorre em uma

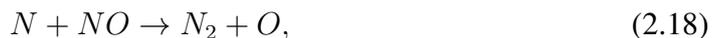
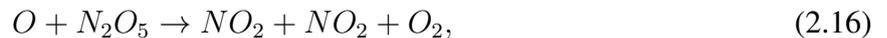
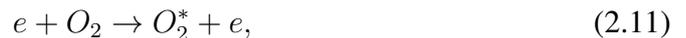
área exposta, onde um canal ionizado está em contato com o ar, a detecção de ozônio serve como uma ferramenta valiosa para detectar e identificar falhas dielétricas. Este método se baseia no princípio de que eventos de DP geram descargas elétricas com energia suficiente para iniciar níveis apreciáveis de reações eletroquímicas no ar circundante. Segundo [5], as reações de produção de ozônio são descritas por

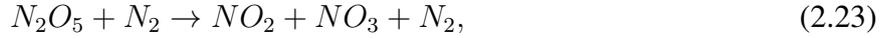
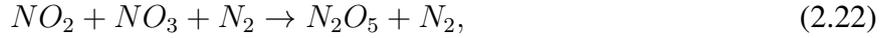


as reações de eliminação de ozônio são descritas por



as reações intermediárias do processo são descritas por





Para o modelo, as espécies excitadas O^* e N^* são desconsideradas por apresentarem baixas concentrações, com seus coeficientes de taxa iguais aos dos átomos no estado fundamental [?]. Normalmente as moléculas em estado excitado possuem um tempo de vida baixo, na ordem de 10^{-8} s, então somente essas espécies com alta energia e que durem tempo o suficiente para as reações de dissociação de O_2 contribuem para a formação de ozônio.

As reações envolvendo elétrons ocorrem majoritariamente na região de plasma, porém os radicais envolvidos no processo produzidos pelas reações com elétrons podem ser transportados para outras regiões devido as ações de convecção e difusão de gases, favorecendo assim a formação de ozônio, mesmo que em menor quantidade, fora da região de plasma. Devido as taxas de produção de ozônio fora do plasma serem baixas, as reações dominantes nessa região são as de destruição de ozônio (2.4)-(2.8).

2.3 Fluidodinâmica Computacional - Equações Gerais

Escoamentos de fluidos viscosos e incompressíveis são descritos ao longo do tempo pelas equações diferenciais

$$\frac{\partial \vec{u}_m}{\partial t} + (\vec{u}_m \cdot \nabla) \vec{u}_m = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}_m + \vec{a}, \quad (2.26)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_m = 0. \quad (2.27)$$

A equação (2.26) é conhecida como equação da conservação de momento e (2.27) é denominada equação da continuidade. Tal sistema é formado pelas conhecidas equações de Navier-Stokes [36–38], nas quais ∇ é o operador vetorial $\nabla \stackrel{def}{=} (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$, t é o tempo (s), $\vec{u}_m = (u, v, w)$ é o vetor velocidade de escoamento (m/s), p é o campo escalar de pressão (Pa), ρ e ν são respectivamente a densidade (kg/m^3) e a viscosidade cinemática (m^2/s) do fluido e \vec{a} representa acelerações externas, tais como a aceleração eletromagnética \vec{a}_m e a gravitacional \vec{a}_g (m/s^2). Vale ressaltar que o termo \vec{a} é usado como fonte de movimento.

Em superfícies rígidas, as paredes são consideradas impermeáveis e não-eskorregadias. Dessa forma, as seguintes condições de contorno devem ser empregadas para a velocidade:

$$u_n = 0 \quad (2.28)$$

e

$$u_t = 0, \quad (2.29)$$

nas quais os subscritos n e t indicam, respectivamente, as componentes de \vec{u}_m normais e tangenciais a uma superfície sólida considerada. A equação (2.28) garante a impermeabilidade e (2.29) assegura que o obstáculo não é escorregadio.

Para solucionar numericamente o sistema formado por (2.26) e (2.27), pode ser aplicada a metodologia MAC (*marker and cell*) [39] associada à discretização por diferenças finitas (ou elementos finitos) e ao esquema apresentado em [40]. A derivada temporal de \vec{u}_m é aproximada por diferenças finitas pela equação

$$\frac{\partial \vec{u}_m}{\partial t} \approx \frac{\vec{u}_m^{n+1} - \vec{u}_m^n}{\Delta_t}, \quad (2.30)$$

na qual n é o número inteiro indexador do tempo e Δ_t o incremento temporal discreto, de forma que $t = n\Delta_t$

Observando o referido sistema (2.26)-(2.27), nota-se que não há uma expressão explícita que descreva a variação da pressão p em relação ao tempo t . Dessa forma, a idéia básica do método MAC [40] é retirar o gradiente de pressão da equação (2.26) e calcular uma velocidade preliminar \vec{u}_m^* (substituindo na mesma \vec{u}_m por \vec{u}_m^*), de forma que

$$\vec{u}_m^{n+1} = \vec{u}_m^* + \delta \vec{u}_m^n. \quad (2.31)$$

Observa-se então, a partir de (2.26) e (2.30), que o termo $\delta \vec{u}_m$ é dado por:

$$\delta \vec{u}_m = -\frac{\Delta_t}{\rho} \nabla p^{n+1}. \quad (2.32)$$

A expressão para p no instante $n + 1$ pode ser encontrada substituindo (2.32) em (2.31) e aplicando-se (2.27), o que fornece,

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta_t} \nabla \cdot \vec{u}_m^*. \quad (2.33)$$

Dessa forma, tem-se um esquema de atualização explícito para a velocidade e um esquema implícito para a pressão.

A equação (2.33) é submetida à condição de contorno

$$\partial p / \partial \vec{n} = 0. \quad (2.34)$$

A condição de contorno (2.34) é aplicada nas superfícies de paredes sólidas presentes no domínio, o que evita acelerações do fluido na direção normal a esses obstáculos, dada pelo vetor \vec{n} . Esta equação é resolvida usualmente pelo método da sobre-relaxação sucessiva [41].

No COMSOL Multiphysics, as equações (2.26) e (2.27) são resolvidas em seu estado estacionário pelo método dos elementos finitos, onde não há variação da velocidade \vec{u}_m com o tempo t . Logo, as equações em estado estacionário podem ser escritas por

$$(\vec{u}_m \cdot \nabla)\vec{u}_m = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\vec{u}_m + \vec{a}, \quad (2.35)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_m = 0. \quad (2.36)$$

2.4 Lei da conservação de massa aplicada para o ozônio

Dado que o ozônio é a única espécie quimicamente diluída em análise no ar, a lei de conservação de massa [36] é expressa por

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} + \vec{u}_m \cdot \nabla c = R, \quad (2.37)$$

em que

$$\vec{J} = -D\nabla c. \quad (2.38)$$

Em (2.37) e (2.38), \vec{J} é o campo vetorial de fluxo de difusão, dado em $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, c é a concentração molar da espécie, dada em mol/m^3 , D é o coeficiente de difusão (m^2/s), R é a taxa molar de produção da espécie por unidade de volume, dada em $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ e \vec{u}_m é o campo vetorial de velocidade média da espécie (m/s).

Em estado estacionário, não há alteração na concentração c em relação ao tempo t . Portanto, a partir da equação (2.37), pode-se derivar a equação de estado estacionário

$$\nabla \cdot \vec{J} + \vec{u}_m \cdot \nabla c = R, \quad (2.39)$$

a qual é numericamente resolvida neste trabalho utilizando o método dos elementos finitos [42].

2.5 Parâmetros da dinâmica dos fluidos de ozônio

A taxa de reação de ozônio R ($\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$) pode ser calculada a partir do rendimento de ozônio η , dado em g/kWh , da potência das descargas P em kW , da massa molar do ozônio $m = 47,997 \text{ g/mol}$ e do volume V_{O_3} da região onde o ozônio é gerado (onde as descargas parciais ocorrem) em m^3 . Conforme [43, 44], ela pode ser calculada por

$$R = \frac{\eta \cdot P}{m \cdot V_{O_3}}. \quad (2.40)$$

O fluxo líquido de deposição de ozônio em superfícies [45] é dado por

$$J_s = -\gamma \frac{\langle v \rangle}{4} C \Big|_{y=\frac{2}{3}l}, \quad (2.41)$$

onde γ é o coeficiente de acomodação de massa do ozônio à superfície de deposição, C é a concentração de ozônio, l é o caminho livre molecular médio ($6,5 \times 10^{-8}$ m, a 293 K e 1 atm), e $\langle v \rangle$ é a velocidade de Boltzmann para o ozônio. A velocidade de Boltzmann $\langle v \rangle$ é dada por

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8R_G T}{\pi m}}, \quad (2.42)$$

onde $R_G = 8,31446261815324 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ é a constante universal dos gases e T é a temperatura (dada em Kelvins). O coeficiente de difusão do ozônio D em (2.38) é $1,82 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

O coeficiente de acomodação de massa γ depende do material da superfície. Os valores do parâmetro γ foram medidos em experimentos conduzidos na literatura científica para diferentes materiais. Os valores utilizados neste trabalho estão mostrados na Tabela 1. Para a tinta epóxi, foi adotado um valor típico de γ para tinta látex, uma vez que o látex elastomérico é disperso na resina epóxi para elasticização dos ligantes de epóxi, proporcionando elevada resistência à fissura e viscosidade de fratura [46].

Tabela 1 – Valores de γ adotados para diferentes materiais no modelo numérico.

Material	γ	Referência
Aço inoxidável	$1,8 \times 10^{-7}$	Mueller et al. [47]
Concreto	$7,9 \times 10^{-5}$	Simmons e Colbeck [48]
Camada de revestimento semicondutor	$1,11 \times 10^{-6}$	Cataldo e Ursini [49]
Epóxi	$2,0 \times 10^{-6}$	Reiss et al. [50, 51]
Cobre	$5,5 \times 10^{-7}$	Gusakov et al. [52]

3 Modelo numérico do hidrogerador

3.1 Geometria e materiais

O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o software COMSOL Multiphysics versão 5.5. O modelo do hidrogerador é baseado em uma unidade geradora da usina hidrelétrica brasileira de Campos Novos. A Figura 9 mostra a estrutura modelada do hidrogerador, e a Tabela 2 lista seus componentes, partes estruturais, materiais e figuras com detalhes geométricos.

Tabela 2 – Os componentes e partes estruturais representados do hidrogerador, materiais e detalhes geométricos.

Componentes e partes estruturais	Material	Detalhes geométricos
Piso e paredes externas	Concreto	Figura 9
Rotor	Superfície de epóxi	Figura 9
378 barras estatóricas do tipo bobina	Cobre revestido por mica e uma camada de revestimento semiconductor	Figura 10
Núcleo estatórico	Aço inoxidável	Figura 11
Direcionadores de ar	Aço inoxidável	Figura 12
Radiador	Cobre	Figura 12

As paredes externas têm uma forma octogonal com arestas medindo $w_l = 5,385$ m e altura $w_h = 4,20$ m (Figura 9). As barras estatóricas, com geometria ilustrada na Figura 5, têm uma altura de $b_h = 3,961$ m e um comprimento de $b_w = 672,74$ mm. Representações de uma barra e da geometria do estator, conforme definido no modelo numérico, são ilustradas na Figura 10. O núcleo do estator tem um raio menor de $c_r = 3,820$ m, um raio maior de $c_R = 4,180$ m, e é composto por quarenta e dois grupos de lâminas de aço magnético, cada uma medindo $c_t = 47,16$ mm de espessura e espaçadas a intervalos de $c_s = 15$ mm para ventilação. Essa estrutura é representada na Figura 2. Cada etapa do núcleo do estator apresenta sulcos medindo $g_l = 33,3$ mm \times $g_h = 128,03$ mm e dentes medindo $t_l = 30,2$ mm \times $t_h = 128,03$ mm (Figura 11).

Os direcionadores de ar têm uma forma semelhante a uma cunha, com oito unidades circundando o gerador para guiar o fluxo de ar do rotor para os radiadores. Esses direcionadores de

ar possuem arestas laterais com comprimento $d_l = 1,615$ m, arestas externas no raio $d_r = 5,468$ m, e uma altura de $d_h = 4,20$ m (Figura 12). Finalmente, o rotor é representado como um cilindro com altura $R_h = 3,34186$ m e raio $R_r = 3,8075$ m. Existem um total de oito radiadores, cada um com largura $r_l = 1,72$ m e altura $r_h = 4,2$ m (Figura 12). O modelo do radiador consiste em um plano onde uma condição de contorno especial (*screen* [53]) é aplicada para reproduzir o efeito da superposição e do espaçamento das folhas do radiador, sem a necessidade de realizar o detalhamento geométrico destas características, evitando elevar ainda mais os requisitos de processamento e de memória nas simulações.

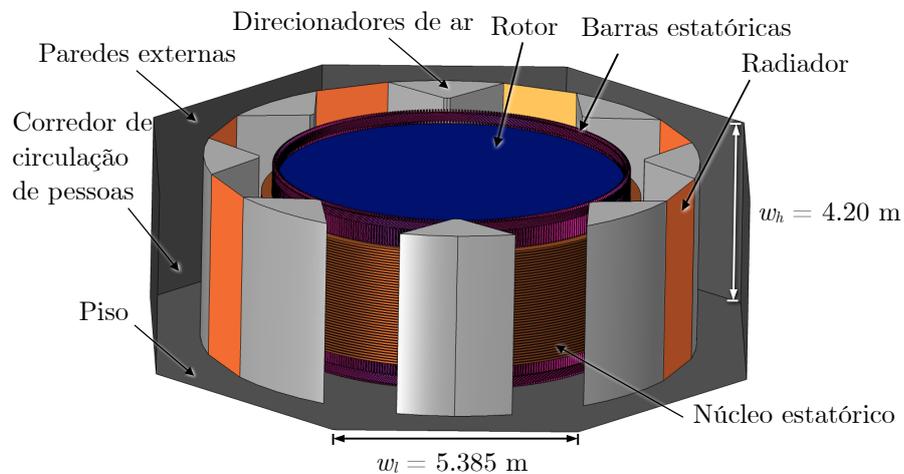


Figura 9 – Visão geral do modelo de elementos finitos do hidrogerador: rotulação das partes estruturais. A altura w_h e largura w_l da parede são fornecidas.

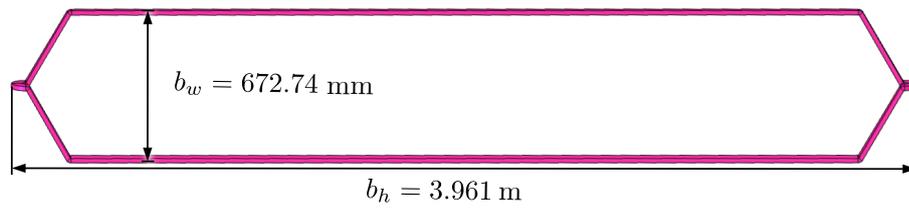


Figura 10 – Barras estáticas do hidrogerador e suas dimensões: (a) modelo da barra tipo bobina e (b) todas as 378 barras estáticas dispostas no modelo do hidrogerador. As dimensões b_w e b_h são fornecidas.

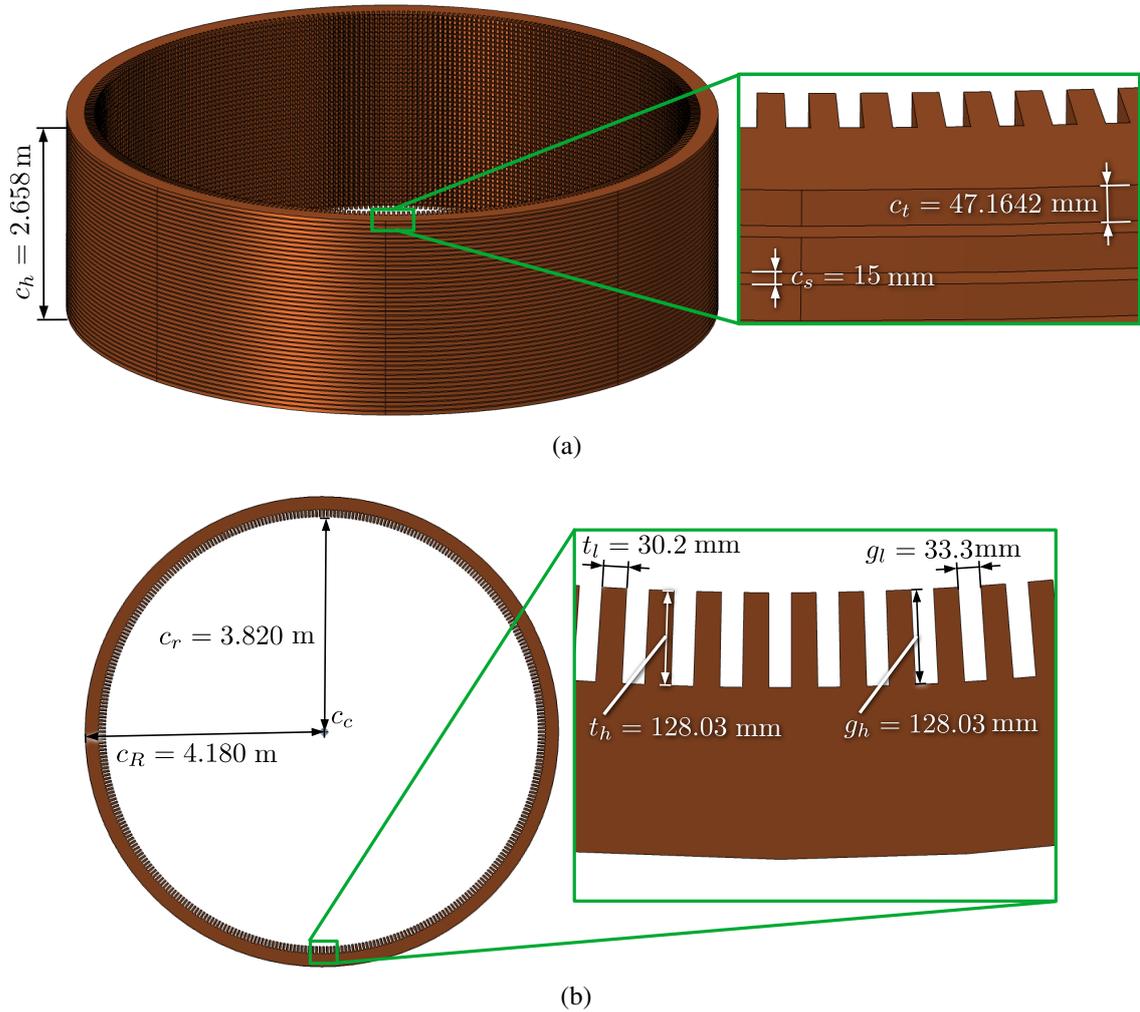


Figura 11 – Núcleo estático do hidrogerador e suas dimensões: (a) vista em perspectiva e (b) vista superior. As dimensões c_h , c_t , c_s , c_r , c_R , t_l , g_l , t_h e g_h são fornecidas.

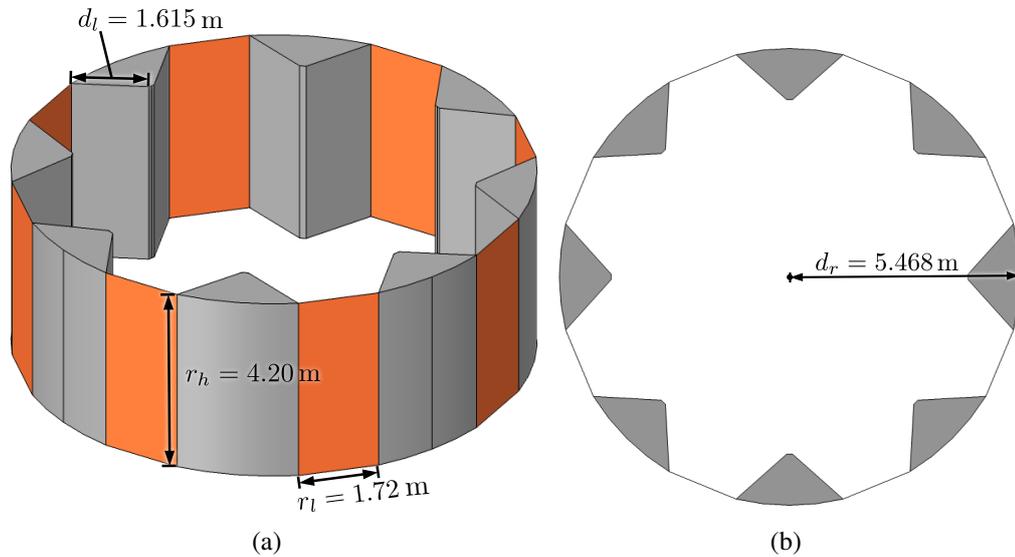


Figura 12 – Direcionadores de ar e radiador do hidrogerador: (a) vista em perspectiva e (b) vista superior. As dimensões d_l , r_l , r_h e d_r são fornecidas.

3.2 Condições de contorno

Na superfície lateral do rotor são aplicadas condições de contorno de velocidade do ar para simular as velocidades angular e radial do ar na proximidade lateral do rotor, conforme detalhado em [21]. A velocidade angular do ar é, naturalmente, devido às rotações do rotor. A velocidade radial é devido à ventilação entre os polos. O próprio rotor gira a uma velocidade constante de 200 RPM, resultando em uma velocidade angular do ar de 87,344 m/s na superfície lateral. Dados de velocidade radial foram obtidos por meio de medições experimentais dentro da região do radiador de uma máquina real, resultando em uma velocidade média de 3 m/s. Consequentemente, na superfície lateral do rotor, a velocidade radial é ajustada para 2,2 m/s. O efeito combinado dessa velocidade radial e o transporte de gás contido pelos direcionadores de ar resulta em uma velocidade média do fluxo de ar de 3 m/s nas regiões do radiador.

Os radiadores são modelados usando um modelo de tela de arame com física de fluxo turbulento e um modelo numérico equivalente de descontinuidade de fluxo para transportar espécies diluídas através das superfícies que representam os radiadores. A condição de contorno de tela é usada quando um fluido passa por uma tela de arame. Uma resistência é criada pela tela, que suprime a componente tangencial da velocidade do gás que entra na tela [53]. Essa resistência depende da solidez da tela σ_s (razão da área bloqueada para a área total) e do número de Reynolds, que por sua vez depende do diâmetro d dos fios que formam a tela. A expressão

usada para representar esse fenômeno através da queda de pressão Δp é

$$\Delta p = \frac{K \rho u^2}{2}, \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade do fluido, u é a velocidade do fluido e K é o coeficiente de resistência [54], que é comumente definido como

$$K = \left(0,52 + \frac{0,66}{Re_d^{4/3}} \right) \cdot \left(\frac{1}{(1-\rho)^2} - 1 \right), \quad (3.2)$$

onde

$$Re_d = |\vec{u}| \cdot \frac{d}{\nu}. \quad (3.3)$$

Em (3.2) e (3.3), Re_d é o número de Reynolds, d é o diâmetro dos fios e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

A condição de contorno de descontinuidade de fluxo no transporte de espécies diluídas é definida por

$$-\vec{n} \cdot [(\vec{J} + \vec{u}_m c)_1 - (\vec{J} + \vec{u}_m c)_2] = N_c, \quad (3.4)$$

onde \vec{n} é o vetor normal à superfície de contorno (radiador), \vec{J} é o vetor de fluxo de difusão, \vec{u}_m é o vetor de velocidade média de massa, c é a concentração molar e N_c é a variação no fluxo total na superfície do radiador à medida que o gás se move do lado a montante (pré-radiador) para o lado a jusante (pós-radiador).

Um teste comparativo é conduzido para determinar os valores numéricos dos parâmetros dos modelos. As simulações são realizadas com uma região de análise numérica reduzida, mantendo as dimensões do radiador. Dois cenários numéricos são considerados: um com a geometria real do radiador, representando a pilha de materiais, e outro com um plano equivalente que incorpora o modelo de tela e a descontinuidade de fluxo. A configuração que apresenta um resultado semelhante à geometria real é encontrada para $\sigma_S = \frac{1}{3}$ e $d = 0,001$ m para a tela em fluxo turbulento e para a descontinuidade de fluxo no transporte de espécies diluídas. Apesar de exigir muito menos recursos computacionais, o modelo equivalente concorda com o modelo completo do radiador.

As reações químicas do ozônio com as superfícies são consideradas a partir de condições de contorno nas superfícies de todos os materiais, onde (2.41) é usada. O parâmetro γ de cada material no modelo é fornecido na Tabela 1. As fontes de ozônio são aplicadas em regiões típicas de ocorrência de descargas parciais nas bobinas estatóricas dos hidrogeradores (Figura 13),

representando contaminação da superfície ou degradação do revestimento. No modelo numérico, prismas são colocados para representar as regiões de DP associadas a doze fontes de ozônio com diferentes volumes.

Neste trabalho, as fontes de ozônio nas barras estatóricas são categorizadas em três grupos de altura, de acordo com suas coordenadas z : fontes inferiores ($z < 800$ mm), fontes intermediárias ($z \geq 800$ mm e $z \leq 3400$ mm) e fontes superiores ($z > 3400$ mm). A categorização de altura e o setor em que cada fonte está localizada estão definidos na Tabela 3. A taxa molar de produção de ozônio por unidade de volume $R = 0,36955 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ é aplicada a todas as fontes. Dessa forma, as regiões de origem com volume de 9090 mm^3 (a fonte S_5 é usada como referência) têm uma concentração média volumétrica de 33.000 ppb que é uma concentração de ozônio encontrada nas proximidades das barras estatóricas dos hidrogenadores [12, 13]. A Tabela 4 apresenta as características de cada fonte (de S_1 a S_{12}): dimensões, volume e concentração média volumétrica de ozônio. Note que a concentração média volumétrica em cada fonte prismática é proporcional ao volume da fonte.

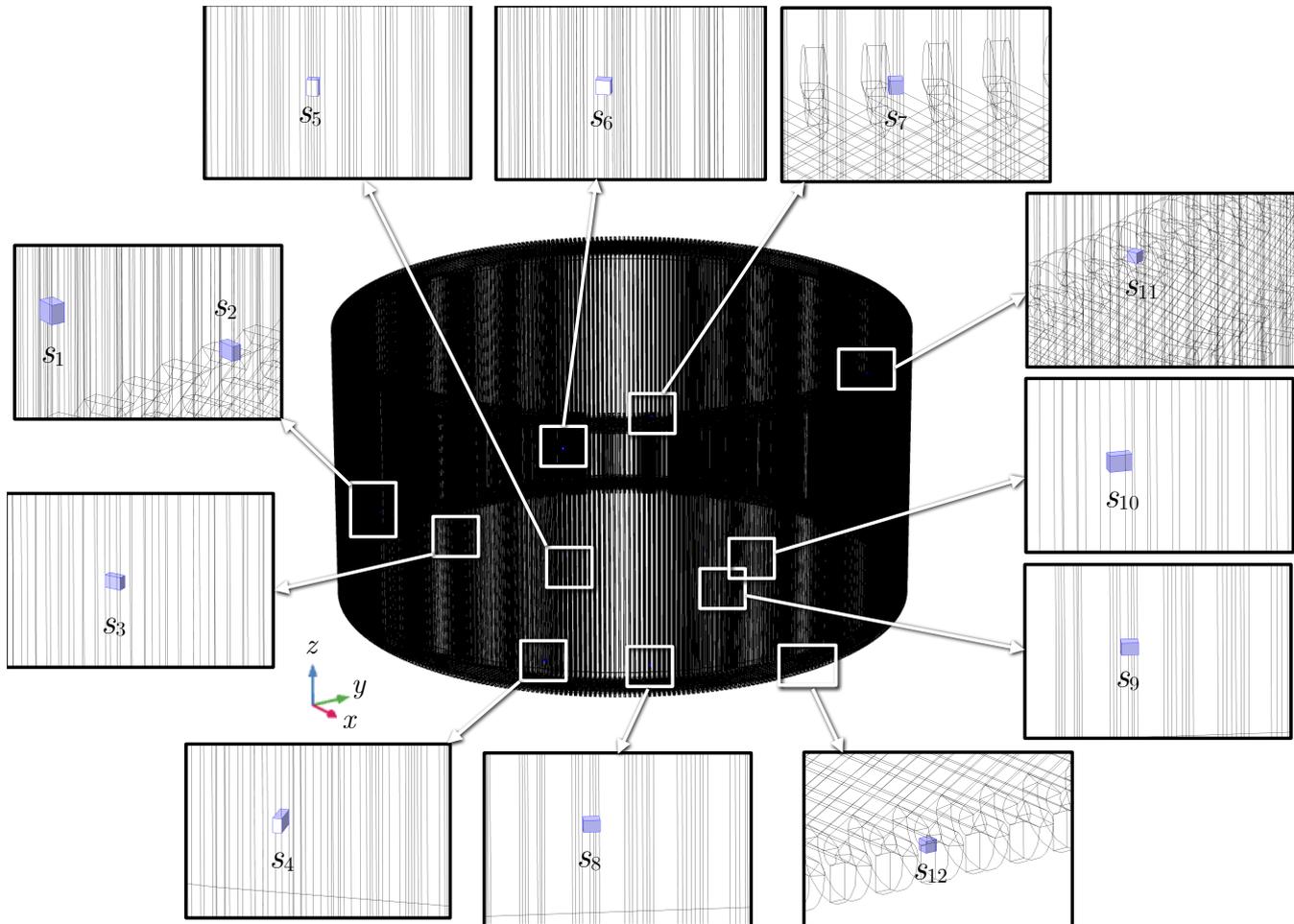


Figura 13 – Posicionamento das fontes (e seus rótulos) nas barras estáticas do hidrogerador.

Tabela 3 – Localizações das fontes de ozônio nas simulações A a D: coordenadas verticais e angulares, categoria de altura e setores.

Fonte	Coordenada radial ρ (m)	Coordenada vertical z (m)	Categoria de altura	Coordenada angular ϕ	Setor
S_1	3,880	2,074	intermediária	270°	entre R_1 e R_2
S_2	3,819	2,074	intermediária	280°	R_2
S_3	3,819	2,074	intermediária	292,5°	R_2
S_4	3,911	0,574	inferior	305°	R_2
S_5	3,880	2,074	intermediária	315°	entre R_2 e R_3
S_6	3,942	3,574	superior	315°	entre R_2 e R_3
S_7	3,911	4,020	superior	330°	R_3
S_8	3,942	0,574	inferior	330°	R_3
S_9	3,880	1,574	intermediária	340°	R_3
S_{10}	3,819	2,074	intermediária	350°	R_3
S_{11}	3,911	4,020	superior	22,5°	R_4
S_{12}	3,850	0,272	inferior	0°	entre R_4 e R_5

Tabela 4 – Volume e concentração volumétrica média de ozônio para cada fonte (simulações A a D).

Fonte	Dimensões (mm)	Volume (mm ³)	Concentração volumétrica média de ozônio (ppb)
S_1	20,2×20×15	6060	22.000
S_2	20,2×15×10	3030	11.000
S_3	20,2×15×10	3030	11.000
S_4	47,2×25×15	17.700	64.257,43
S_5	30×20,2×15	9090	33.000
S_6	20,2×20×15	6060	22.000
S_7	15×15×15	3375	12.252,48
S_8	20,2×15×15	4545	16.500
S_9	20,2×20,2×15	6120,6	22.220
S_{10}	20,2×15×10	3030	11.000
S_{11}	15×15×15	3375	12.252,48
S_{12}	15×15×15	3375	12.252,48

3.3 Malha de elementos finitos e recursos computacionais

A malha de elementos finitos concebida para realizar as simulações é mostrada na Figura 14. A malha é projetada para utilizar quase toda a capacidade dos computadores disponíveis. Dessa forma, é utilizado um método de calibração pré-definido para dinâmica dos fluidos no COMSOL Multiphysics. Com esse procedimento de calibração, a qualidade média dos elementos é 0,4107 e o número de elementos tetraédricos que compõem a malha é 6.422.513, com 2.035.250 triângulos, 695.575 elementos de aresta e 152.260 elementos de vértice. Para os prismas que representam as fontes, o comprimento máximo da aresta dos elementos da malha é de 2 mm, portanto, a malha é muito fina nas regiões das fontes (Figura 15).

Três estações de trabalho são utilizadas para executar as simulações, cada uma equipada com um processador AMD Ryzen 9 5950X 16-Core e 128 GB de RAM. Todas as três máquinas operam em paralelo para cada simulação. O tempo total de execução é de 14 horas, 4 minutos e 14 segundos, sendo que cada simulação requer aproximadamente 123 GB de RAM por computador.

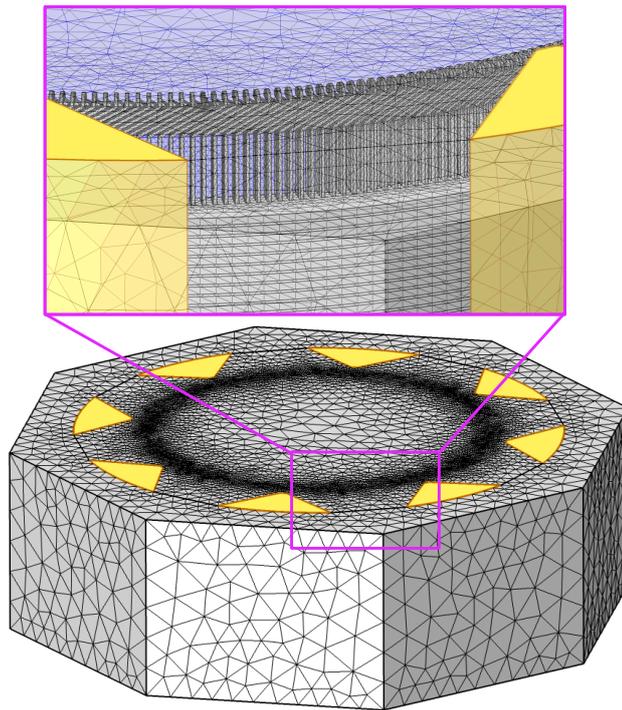


Figura 14 – Visão geral da malha de elementos finitos concebida para representar a estrutura do hidrogerador. As regiões amareladas são os direcionadores de ar.

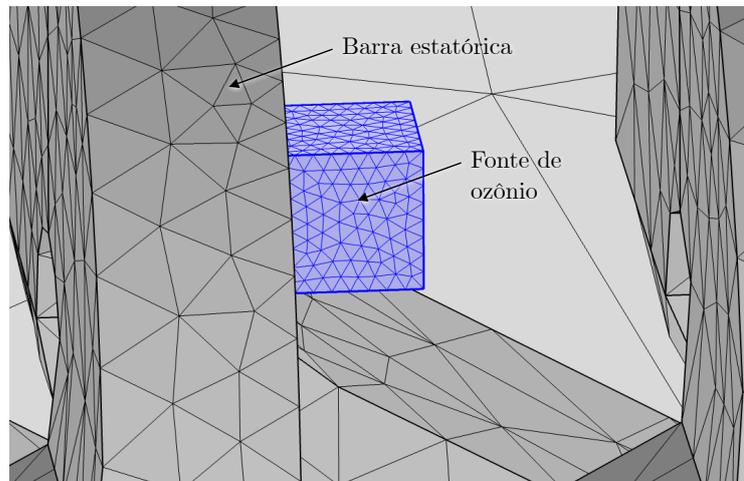


Figura 15 – Parte da malha computacional concebida para representar as fontes de ozônio (destacadas em azul) e as barras estatóricas.

4 Resultados e discussões

4.1 Modelo de tela equivalente do radiador

Nesta seção, são apresentados testes de referência do modelo equivalente de tela do radiador. A representação dos radiadores usando o modelo de tela é também uma contribuição inédita deste trabalho que tornou possível adequar os recursos necessários à simulação do hidrogenador à capacidade computacional disponível e foi baseada no embasamento teórico fornecido em [53,54] como ponto de partida. As simulações comparando os parâmetros ajustados do modelo de tela equivalente com o modelo realista do radiador (representação de chapas de cobre) são mostradas nas Figuras 16-20. A Figura 16 mostra a transmissão de ozônio, para os modelos de tela e chapas de cobre, através do radiador em função da velocidade do ar enquanto a Tabela 5 compara o tempo de processamento e a memória utilizada nas simulações dos dois modelos.

Nas Figuras 17-20, a velocidade de ventilação é ajustada para 3 m/s, que é a velocidade média do ar radial medida experimentalmente no gerador real. A Figura 17 mostra as perspectivas das distribuições de ozônio para os casos em que o radiador é representado com o modelo de tela e simulações realistas do radiador em cobre. A Figura 18 mostra o campo de velocidade do ar no plano yz atravessando o domínio pela metade. A Figura 19 mostra as distribuições de ozônio no mesmo plano yz e casos da Figura 18. Por fim, a Figura 20 mostra a distribuição de ozônio no plano xz separado por 10 mm do plano do radiador (no lado de saída do gás do radiador).

Os resultados apresentados nesta seção indicam que o modelo de tela equivalente do radiador é adequado para substituir o modelo realista e, portanto, é adequado para representar radiadores no modelo do hidrogenador. Note que o modelo baseado em folhas de cobre realista aumentaria significativamente os recursos computacionais necessários para realizar as simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD) do hidrogenador.

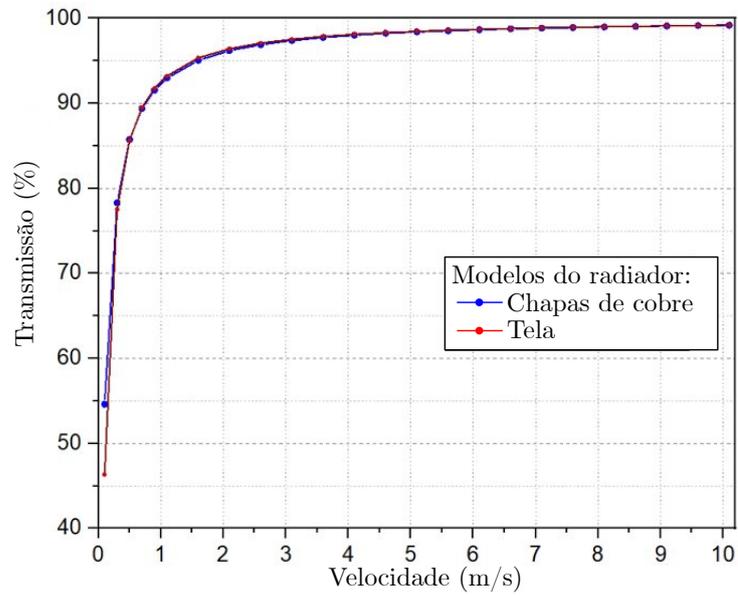


Figura 16 – Transmissões de ozônio através de modelos numéricos de radiadores em função da velocidade do ar: modelos de chapas de cobre e tela.

Tabela 5 – Comparação de tempo de processamento e memória utilizada entre os modelos do radiador.

Modelo	Tempo de processamento	Memória utilizada
Chapas de cobre	4 horas e 4 minutos	44,81 GB
Tela	1 minuto e 10 segundos	1,61 GB

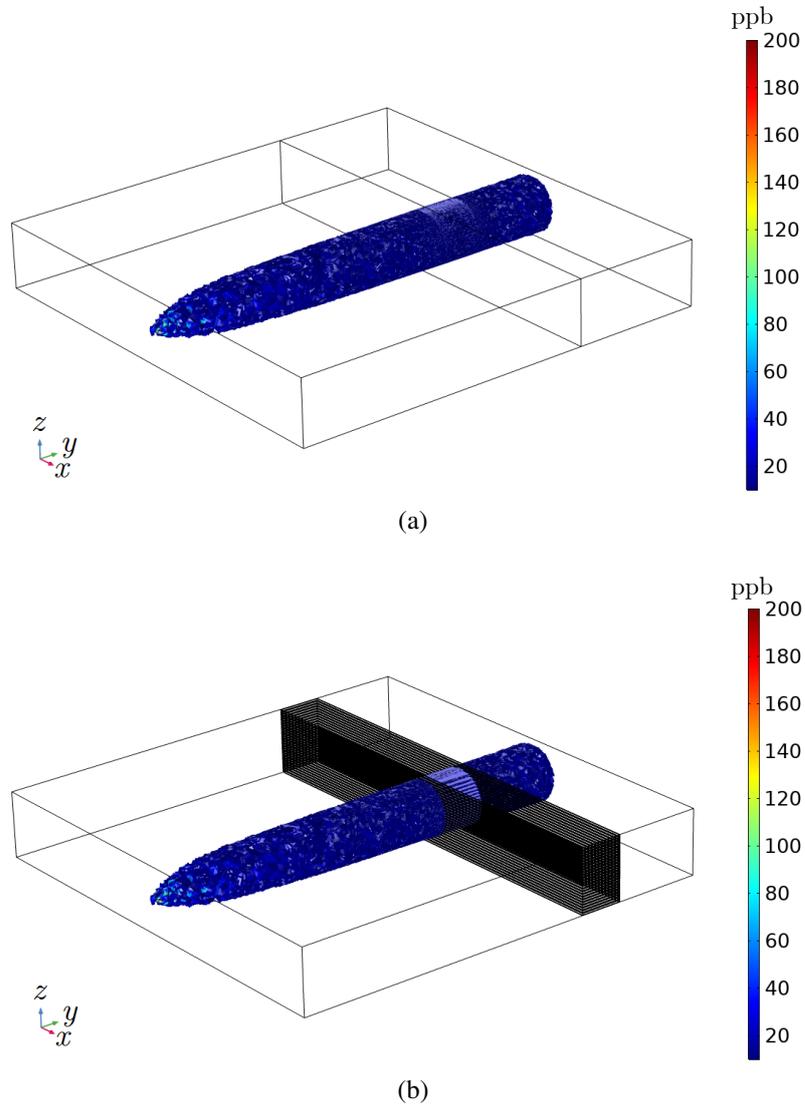


Figura 17 – Vistas em perspectiva das distribuições de concentração de ozônio (ppb) em simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.

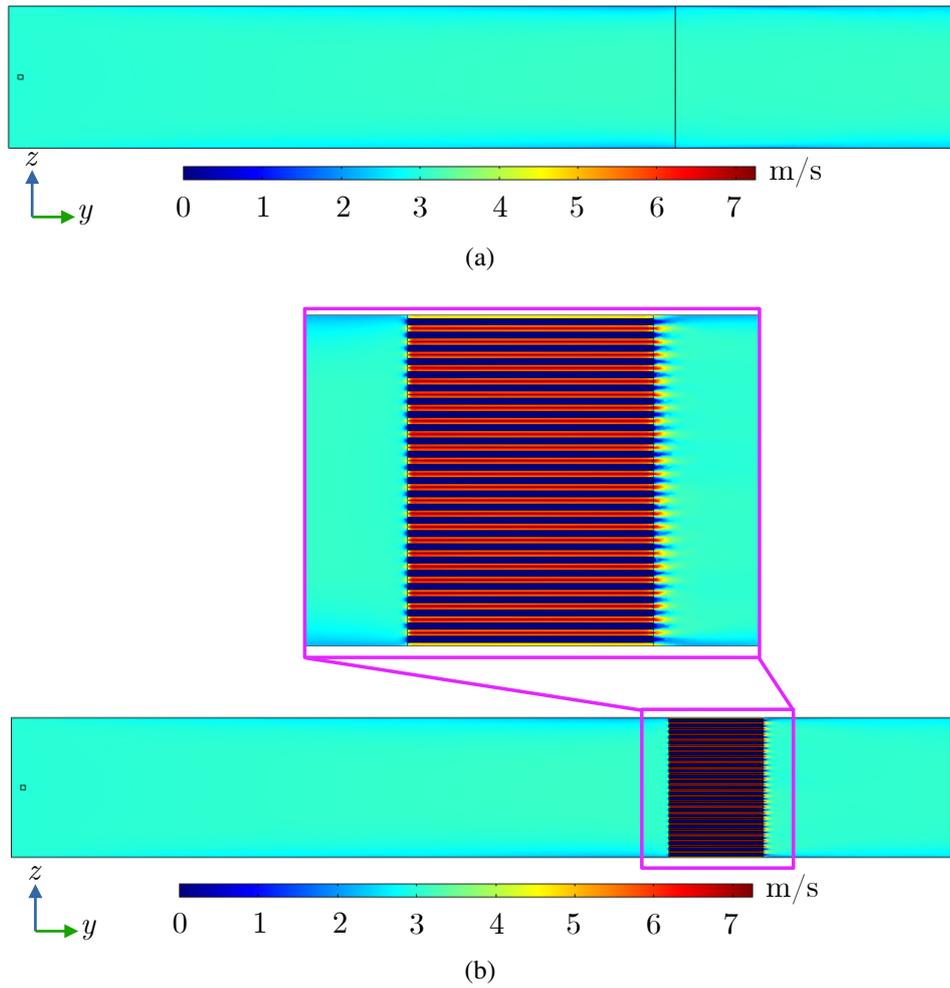


Figura 18 – Magnitude do campo de velocidade (m/s) no plano yz nas simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.

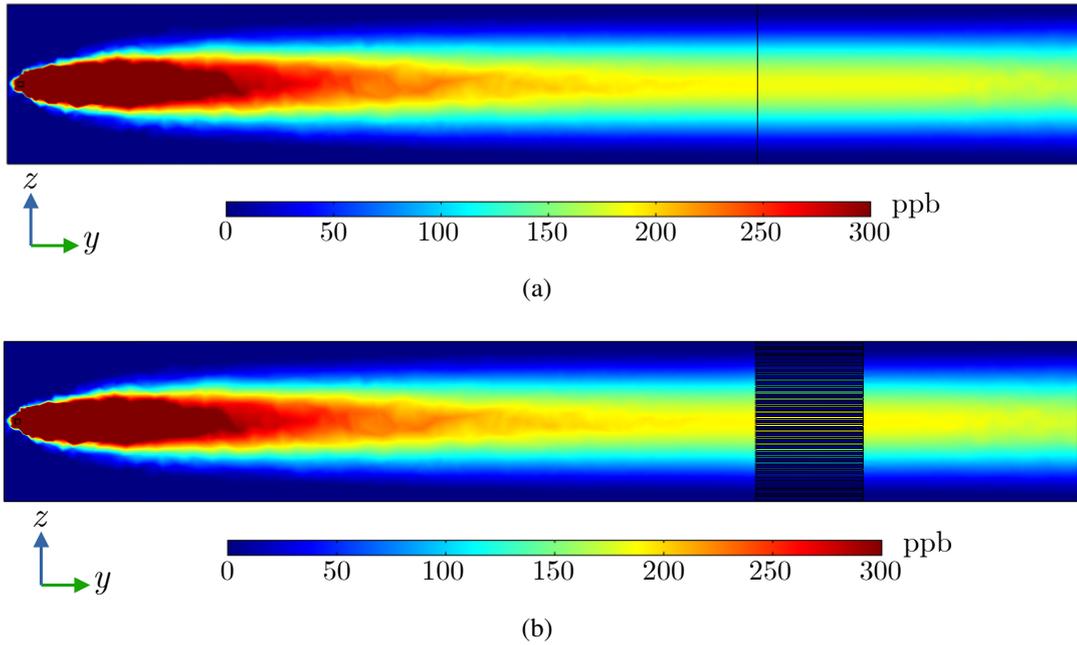


Figura 19 – Concentrações de ozônio (ppb) no plano yz nas simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.

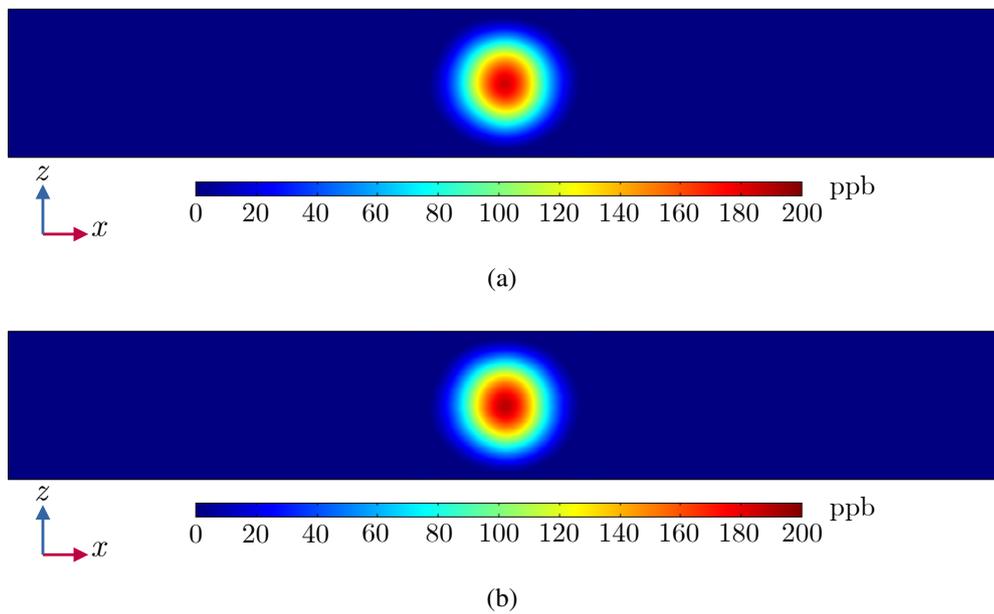


Figura 20 – Concentrações de ozônio (ppb) no plano xz nas simulações de referência: (a) modelo de tela do radiador e (b) representação realista em cobre do radiador.

4.2 Fluidodinâmica e distribuição de ozônio em modelo tridimensional completo de hidrogerador

Nesta seção, são apresentados os resultados numéricos das simulações com o modelo completo do hidrogerador. Cada radiador é atribuído a um rótulo específico, de R_1 a R_8 , como ilustrado pela Figura 21, facilitando a visualização das respectivas concentrações de ozônio nas superfícies dos radiadores. Compreender os resultados dentro do corredor de circulação de pessoal é também particularmente significativo, já que esta área permite o tráfego humano e oferece locais viáveis para a colocação de sensores de ozônio para monitoramento de PD. Vale ressaltar que as concentrações máximas e médias de ozônio no corredor são calculadas numericamente neste trabalho, abrangendo os 360° ao redor do hidrogerador e estendendo-se por toda a sua altura. Da mesma forma, a concentração média espacial de ozônio em um determinado radiador é obtida pela média da concentração de gás sobre a superfície desse radiador.

Foram realizadas quatro simulações, rotuladas como A, B, C e D. Na simulação A, nove fontes de ozônio foram ativadas (com as fontes S_1 , S_9 e S_{11} desativadas de acordo com o posicionamento das fontes estabelecido na Tabela 3). Para a simulação B, dez fontes estavam ativas (com as fontes S_1 e S_9 desativadas). Na simulação C, onze fontes estavam ativas (com a fonte S_1 desativada), e na simulação D, todas as fontes estavam ativas (veja a posição das fontes na Figura 13). As vistas em perspectiva da distribuição de ozônio para cada simulação são apresentadas nas Figuras 22 e 23. Além disso, as vistas superiores ilustrando a distribuição de ozônio para essas simulações são exibidas nas Figuras 24 e 25. As Figuras 26 a 30 ilustram o campo de vetores de velocidade e seu impacto no fluxo de ozônio em várias regiões do hidrogerador. O tamanho dos vetores é representado em uma escala logarítmica. Em seguida, são apresentadas as distribuições de ozônio nas superfícies dos radiadores para cada simulação, representadas nas Figuras 31 a 35.

Os resultados são apresentados tanto em vista 3D quanto em vista superior, exibindo concentrações de ozônio a partir de 10 ppb, que é o limite inferior típico de detecção para sensores eletroquímicos de ozônio. Nas Figuras 22 a 30, a escala de cores está definida dentro da faixa de 10 a 100 ppb para aprimorar a visualização da concentração. No entanto, é importante observar que a cor vermelha representa valores iguais ou superiores a 100 ppb, conforme indicado nas respectivas legendas das figuras. Da mesma forma, nas Figuras 31 a 35, a escala de cores é configurada para valores na faixa de 0 a 50 ppb, com a cor vermelha indicando concentrações iguais ou superiores a 50 ppb.

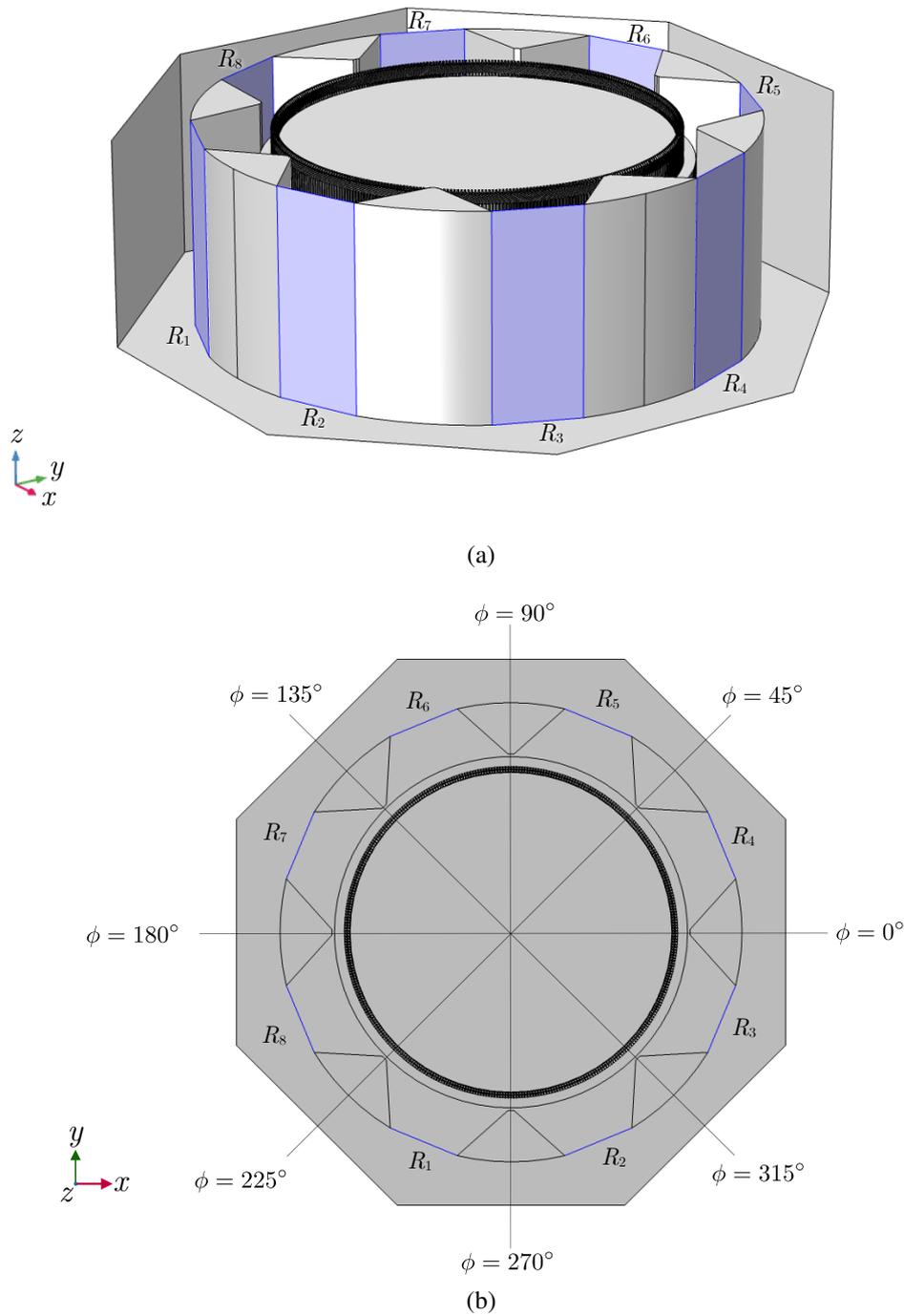
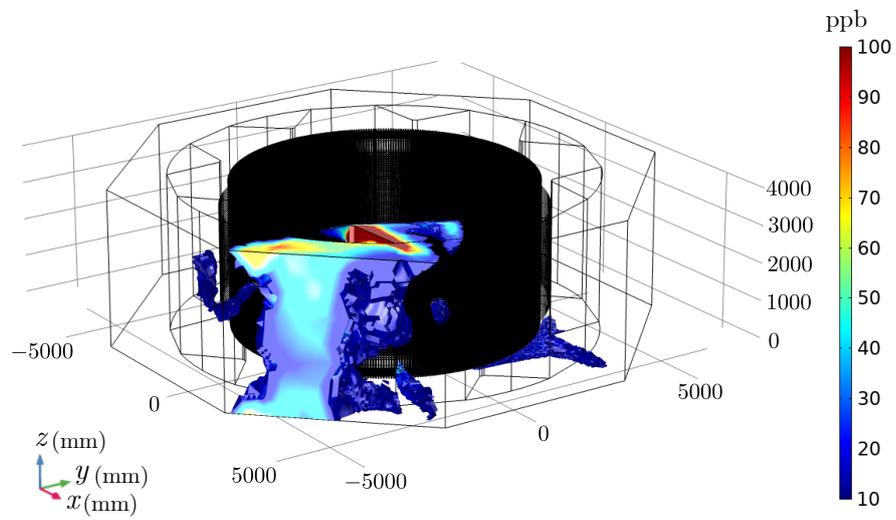
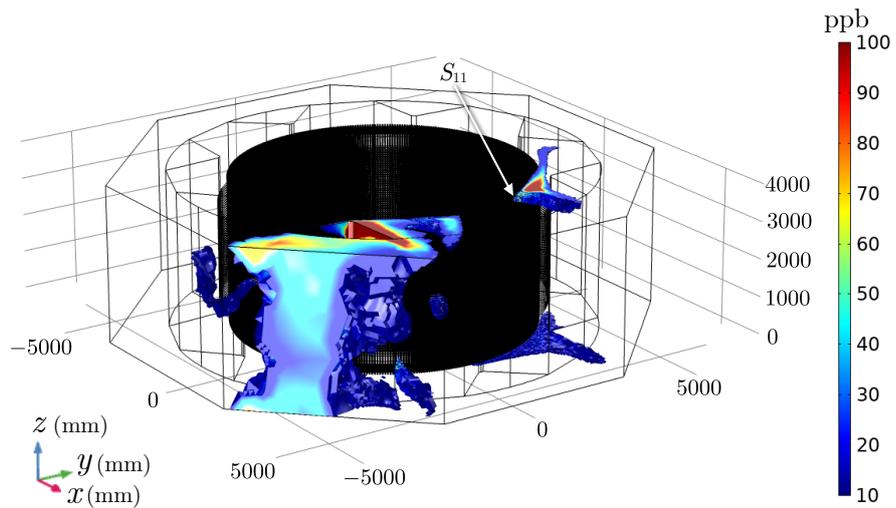


Figura 21 – Rótulos de cada radiador do hidrogenador e ângulos de referência: (a) vista em perspectiva e (b) vista superior. Os radiadores são apresentados em tons de azul.

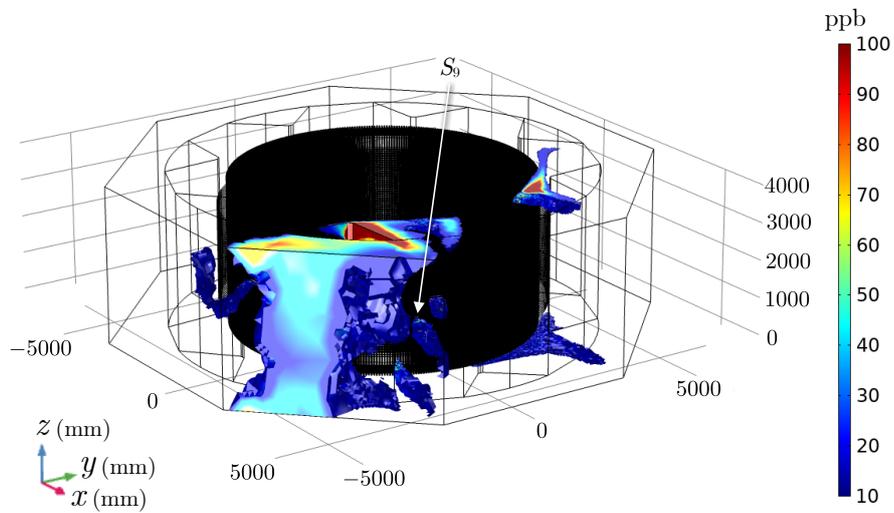


(a)

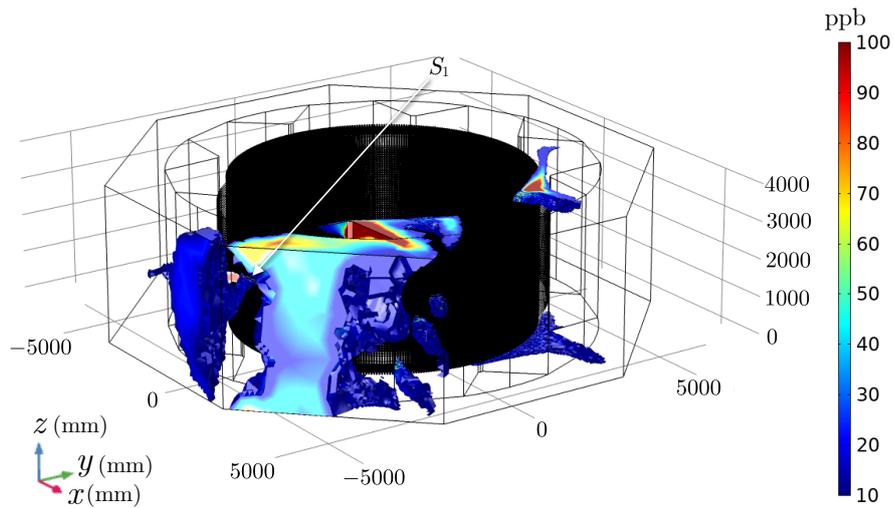


(b)

Figura 22 – Visão geral da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador para as simulações (a) A e (b) B (com a fonte S_{11} adicionalmente ativada).



(a)



(b)

Figura 23 – Visão geral da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) C (fonte S_9 adicionalmente ativada) e (b) D (fonte S_1 adicionalmente ativada).

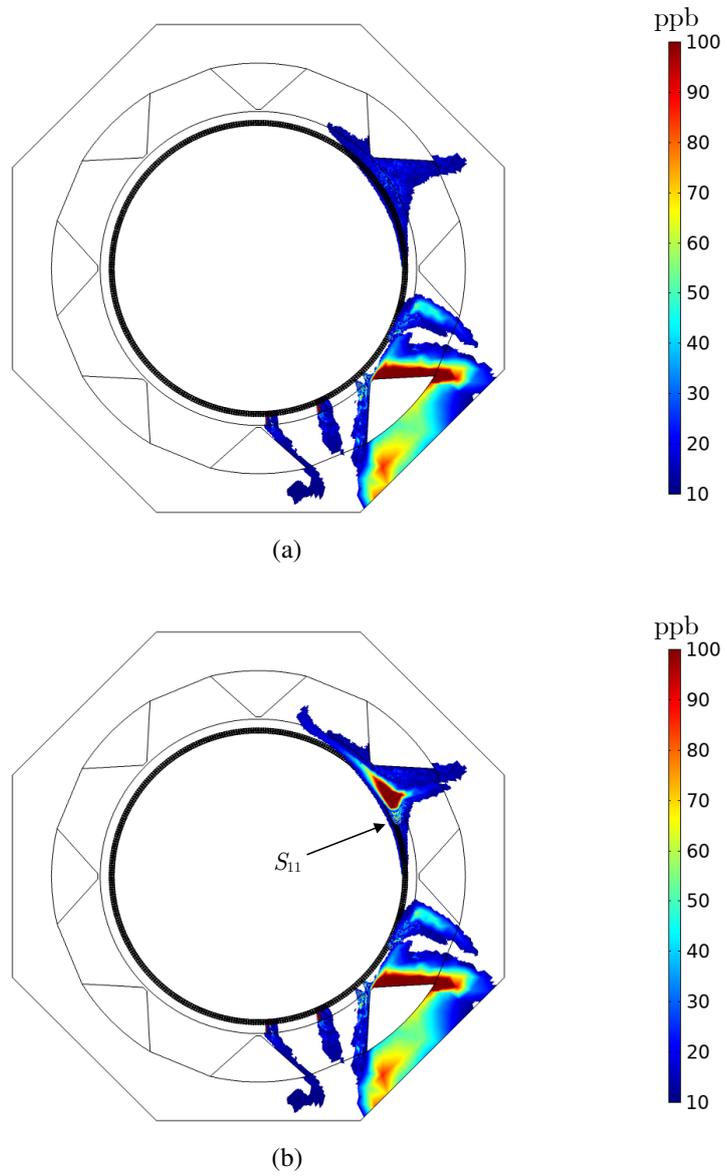


Figura 24 – Visão superior da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) A e (b) B (fonte S_{11} adicionalmente ativada).

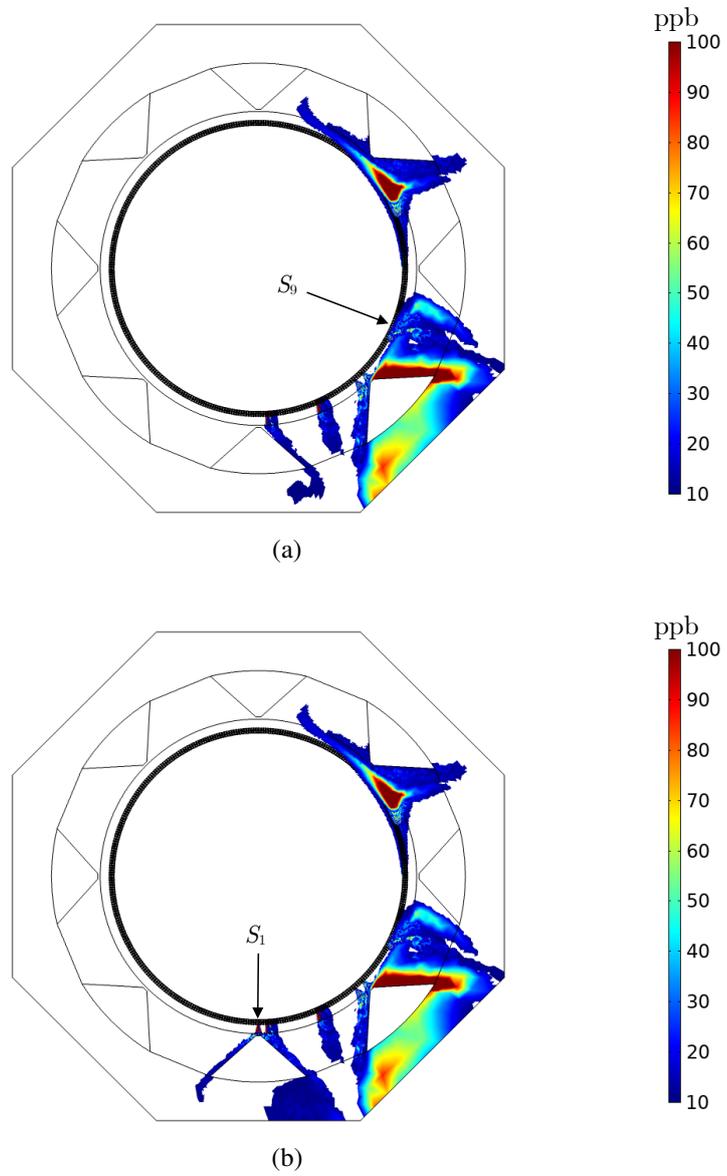


Figura 25 – Visão superior da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador nas simulações: (a) C (S_9 adicionalmente ativada) e (b) D (S_1 adicionalmente ativada).

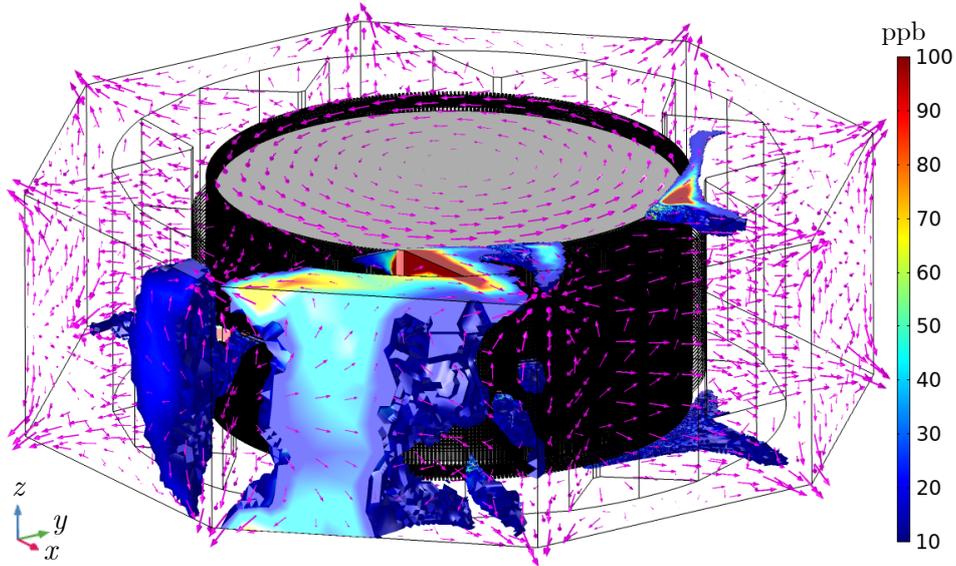


Figura 26 – Visão geral da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador para a simulação D (incluindo o campo de velocidade vetorial com tamanhos de vetor em escala logarítmica).

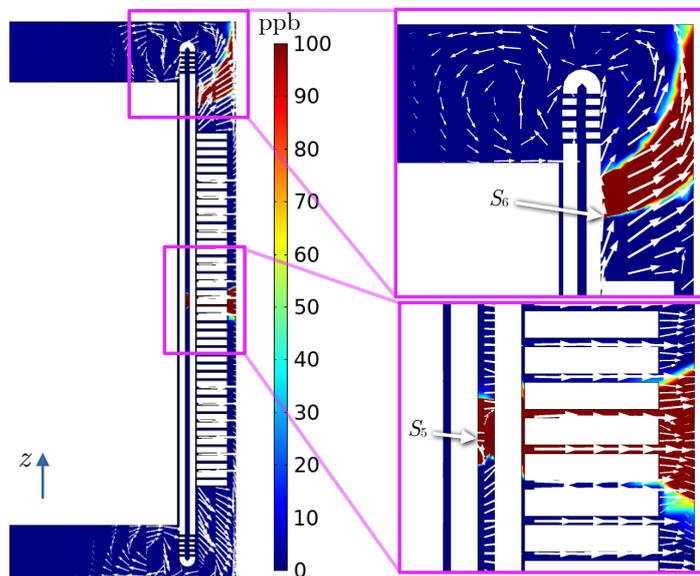


Figura 27 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade no plano vertical perpendicular às fontes S_5 e S_6 (simulação D, $\phi = 315^\circ$).

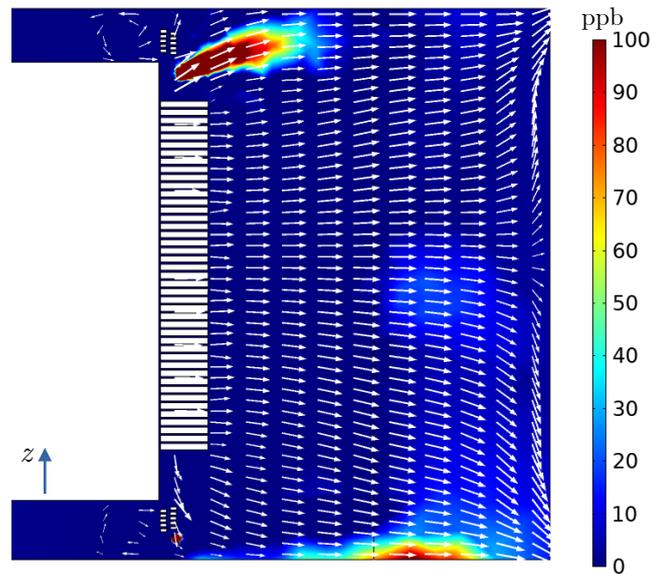


Figura 28 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade no plano vertical perpendicular ao radiador R_3 (simulação D, $\phi = 337, 5^\circ$).

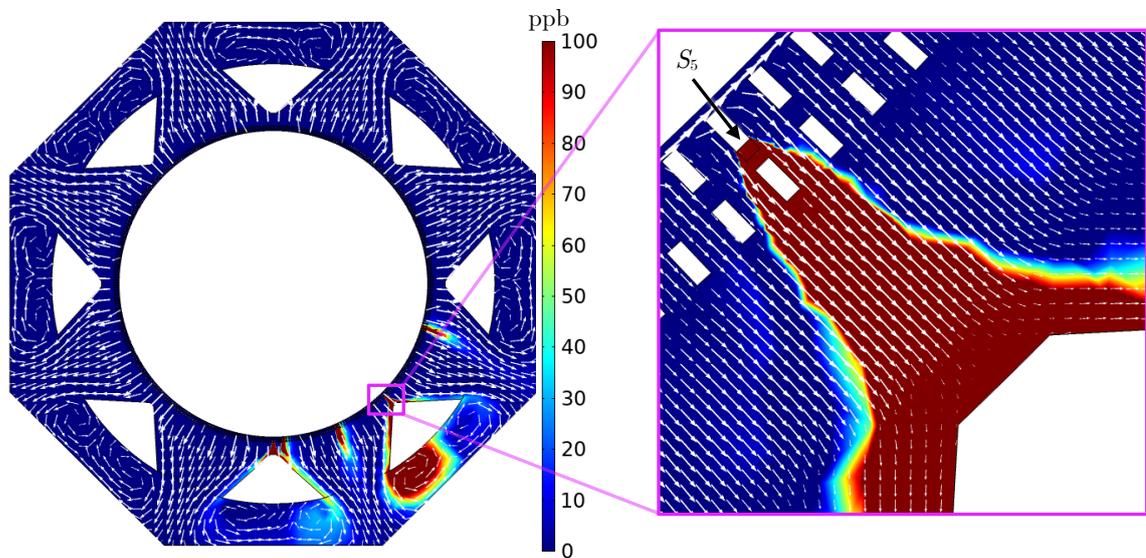


Figura 29 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade no plano horizontal perpendicular à fonte S_5 (simulação D, $z = 2, 070$ m).

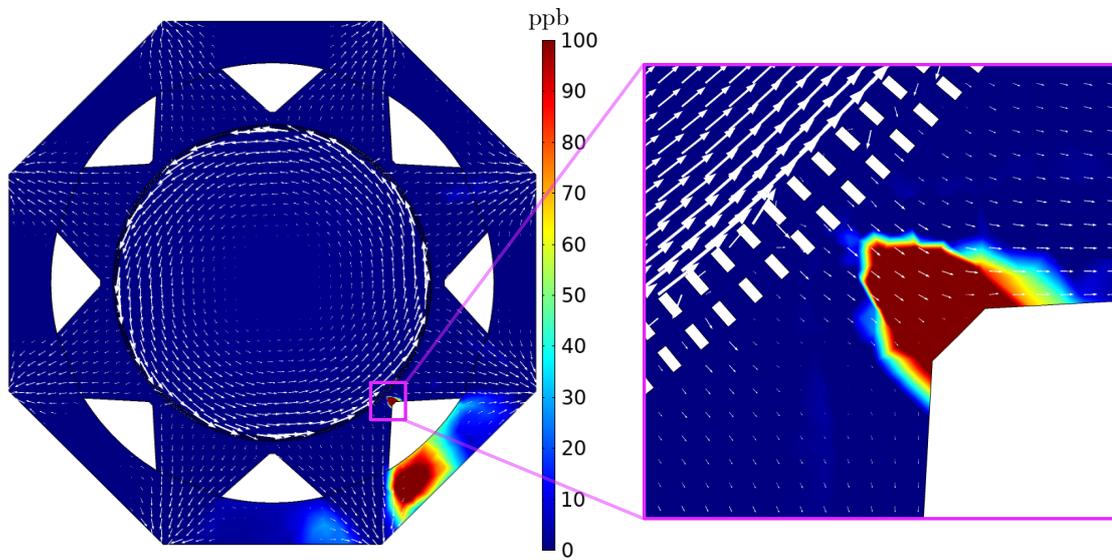


Figura 30 – Distribuição de ozônio (ppb) e campo de velocidade em um plano horizontal na região superior do hidrogerador (simulação D, $z = 3,750$ m).

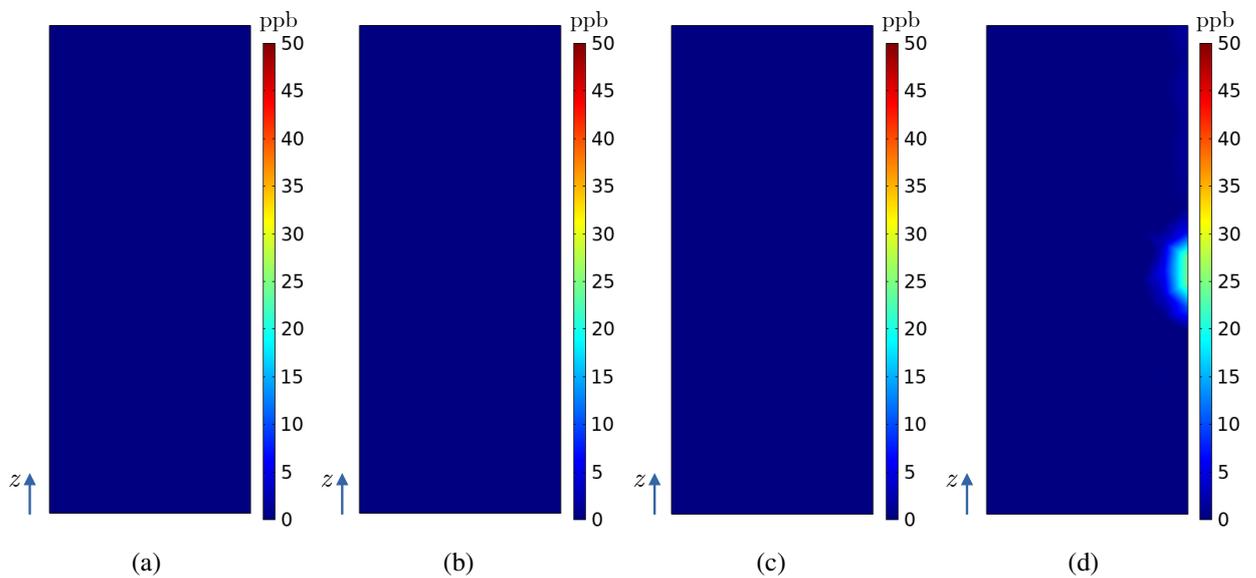


Figura 31 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_1 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.

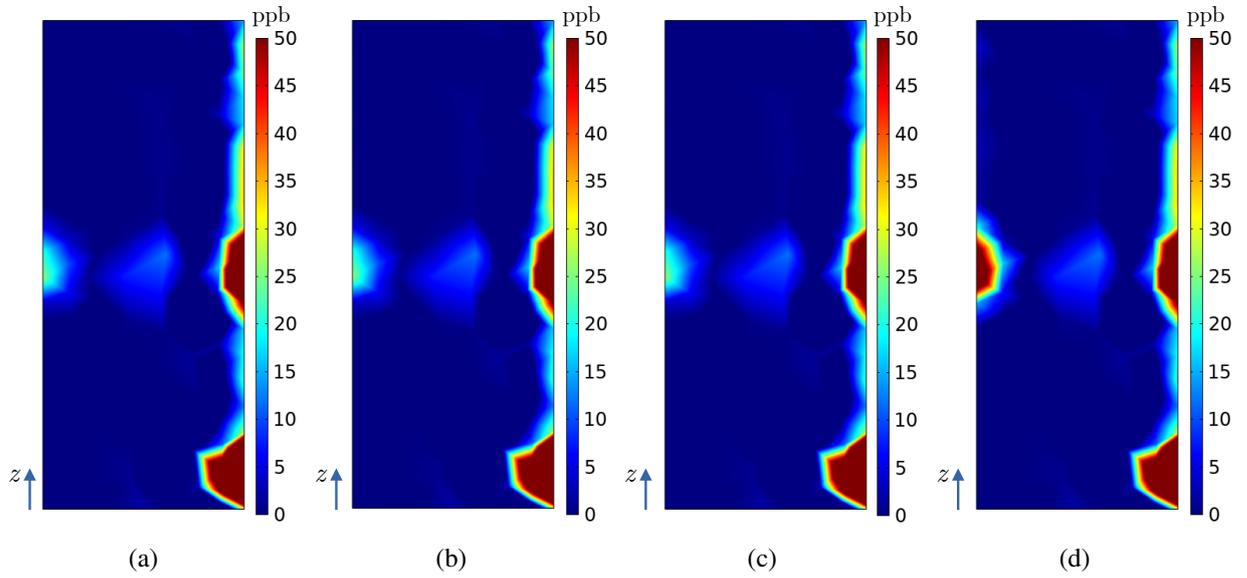


Figura 32 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_2 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.

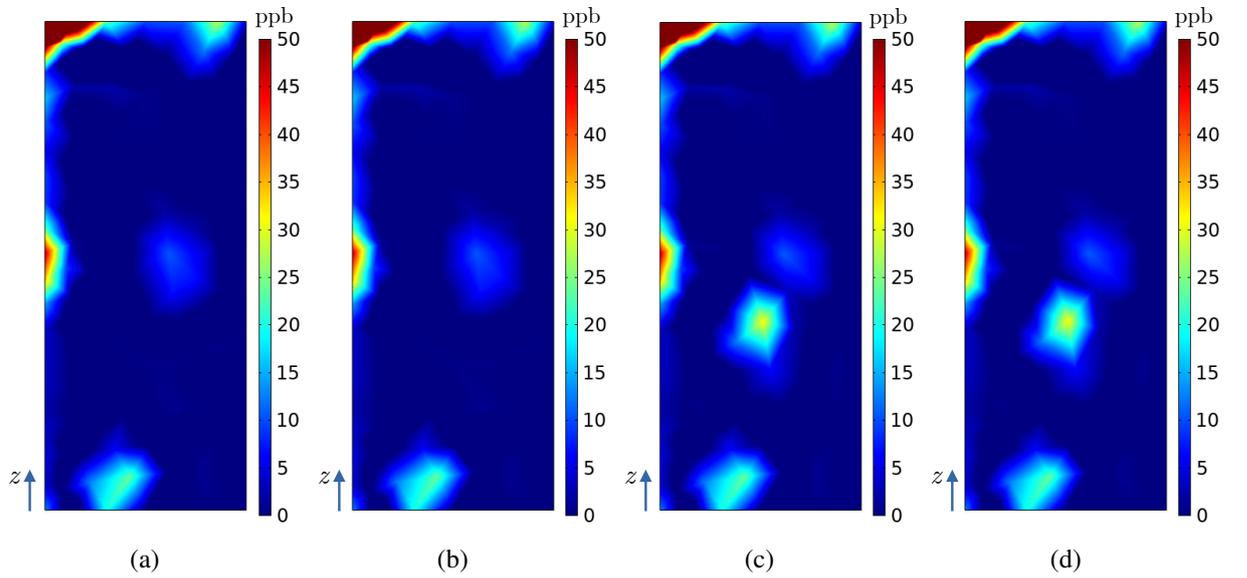


Figura 33 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_3 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.

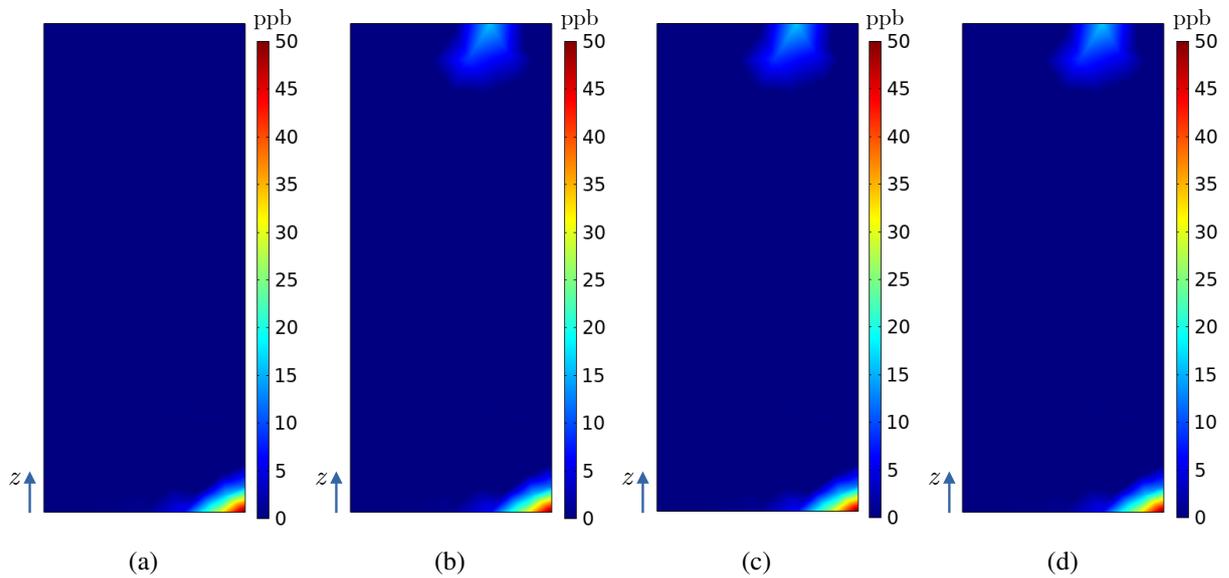


Figura 34 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_4 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.

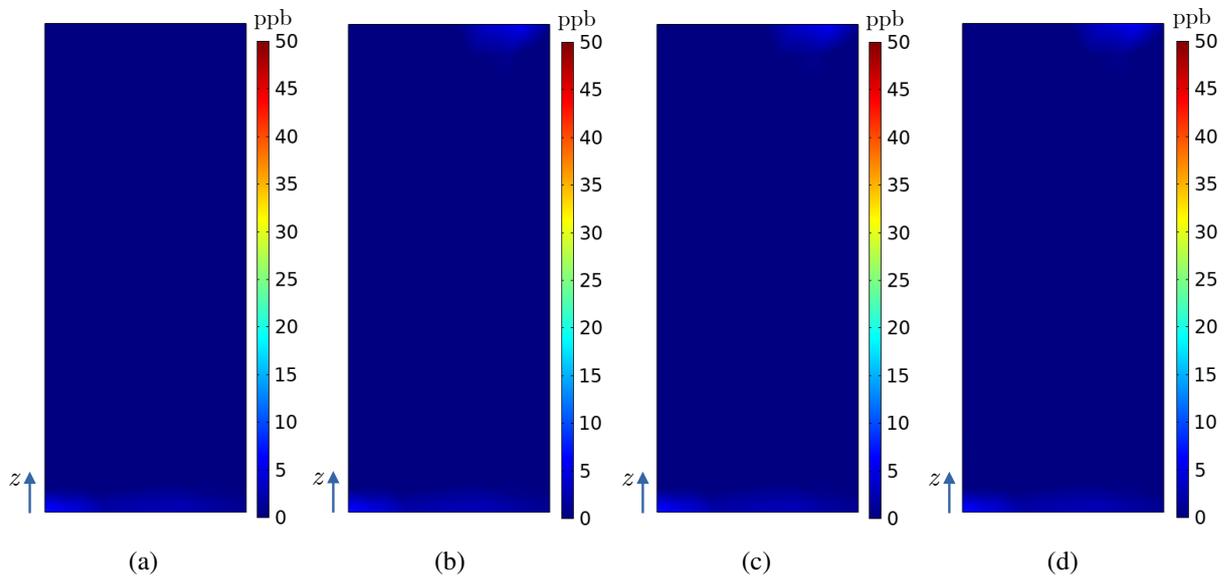


Figura 35 – Concentrações de ozônio (ppb) na superfície do radiador R_5 no modelo numérico do hidrogerador para as simulações: (a) A, (b) B, (c) C e (d) D.

As Figuras de 26 a 30 destacam a variação na componente predominante do campo de velocidade dentro do hidrogerador, dependendo da altura analisada. Nas alturas centrais ($z \geq 800$ mm e $z \leq 3400$ mm), o campo de velocidade é principalmente radial, com contribuições mínimas

dos componentes azimutal e vertical, como mostrado nas Figuras 26, 27, 28, e 29. Por outro lado, nas regiões superior e inferior ($z < 800$ mm ou $z > 3400$ mm) do hidrogerador, o fluxo azimutal predomina, com influências significativas dos componentes verticais, conforme ilustrado nas Figuras 26, 27, 28 e 30.

Ao analisar as Figuras de 22 a 35, é possível observar a influência da ativação de cada fonte. O efeito da ativação da primeira fonte (fonte S_{11}) é visto nos seguintes pares de Figuras: 22(a) e 22(b); 24(a) e 24(b); 34(a) e 34(b); 35(a) e 35(b). Como S_{11} é uma fonte localizada na região superior da barra do estator no setor R_4 , há uma grande influência do componente azimutal da velocidade (Figuras 26, 27, 28 e 30), fazendo com que o ozônio seja transportado para outros setores do hidrogerador, seguindo a direção de rotação do rotor (sentido anti-horário). Assim, é possível observar contribuições desta fonte na concentração de ozônio nos setores R_4 e R_5 .

Para verificar o efeito da ativação da segunda fonte (fonte S_9), os seguintes pares de figuras são analisados: 22(b) e 23(c); 24(b) e 25(c); 33(b) e 33(c). Como a fonte S_9 está localizada no centro do setor R_3 , o ozônio gerado é principalmente influenciado pelo componente radial da velocidade (Figuras 26, 27, 28 e 29), o que significa que a maior contribuição desta fonte está no setor em que está localizada (setor R_3).

Finalmente, é avaliado o impacto da terceira e última fonte que é ativada, S_1 , por meio dos seguintes pares de Figuras: 23(c) e 23(d); 25(c) e 25(d); 31(c) e 31(d); 32(c) e 32(d). Semelhante a S_9 , S_1 está posicionada centralmente e, portanto, é principalmente influenciada pelo componente radial da velocidade, conforme mostrado nas Figuras 26, 27, 28, and 29. No entanto, por estar localizada entre dois setores, sua contribuição para a concentração de ozônio é evidente nos radiadores setoriais R_1 e R_2 , respectivamente. Para uma visão abrangente dos valores máximos e médios de concentração de ozônio em todas as simulações para cada radiador e dentro do corredor de circulação de pessoal, consulte a Tabela 6.

Tabela 6 – Concentrações de ozônio (ppb) no corredor de circulação de pessoal e na superfície dos radiadores para cada simulação (de A a D).

Parâmetro de concentração de O_3	Simulação A	Simulação B	Simulação C	Simulação D
Concentração máxima no corredor de circulação de pessoal	209,37	209,32	209,35	209,32
Concentração média no corredor de circulação de pessoal	3,9630	3,9602	3,9515	4,3975
Concentração máxima no radiador R_1	0	0	0	25
Concentração média no radiador R_1	0	0	0	0,2431
Concentração máxima no radiador R_2	159	159	159	159
Concentração média no radiador R_2	3,7132	3,7122	3,7124	4,1252
Concentração máxima no radiador R_3	209	209	209	209
Concentração média no radiador R_3	2,47	2,4715	3,0153	3,0152
Concentração máxima no radiador R_4	51,1	51,7	51,3	51,3
Concentração média no radiador R_4	0,2605	0,49	0,4842	0,4842
Concentração máxima no radiador R_5	7,61	7,62	7,54	7,54
Concentração média no radiador R_5	0,0728	0,1169	0,1172	0,1172

Para comparar os valores máximos e médios de concentração de ozônio obtidos nas simulações A, B, C e D, as equações

$$PD_{max}^{i,j} = |(C_{max}^i - C_{max}^j)/C_{max}^i| \times 100\% \quad (4.1)$$

e

$$PD_{avg}^{i,j} = |(C_{avg}^i - C_{avg}^j)/C_{avg}^i| \times 100\% \quad (4.2)$$

são usadas, onde $PD_{max}^{i,j}$ é a diferença percentual entre as concentrações máximas de ozônio C_{max}^i e C_{max}^j obtidas respectivamente nas simulações i e j , e $PD_{avg}^{i,j}$ é a diferença percentual entre

as concentrações médias de ozônio C_{avg}^i e C_{avg}^j obtidas nas simulações i e j , respectivamente. As Tabelas 7 e 8 mostram as diferenças percentuais entre as concentrações de ozônio entre as simulações.

Tabela 7 – Diferenças percentuais entre as concentrações máximas de ozônio entre as simulações.

Região	$PD_{max}^{A,B}(\%)$	$PD_{max}^{A,C}(\%)$	$PD_{max}^{A,D}(\%)$	$PD_{max}^{B,C}(\%)$	$PD_{max}^{B,D}(\%)$	$PD_{max}^{C,D}(\%)$
Corredor de Circulação de Pessoal	0,0239	0,0095	0,0239	0,0143	0	0,0143
Radiador R_1	–	–	100	–	–	–
Radiador R_2	0	0	0	0	0	0
Radiador R_3	0	0	0	0	0	0
Radiador R_4	1,1742	0,3914	0,3899	0,7737	0,7737	0
Radiador R_5	1,6	0,5333	0,5305	1,0499	1,0499	0

Tabela 8 – Diferenças percentuais entre as concentrações médias espaciais de ozônio entre as simulações.

Região	$PD_{avg}^{A,B}(\%)$	$PD_{avg}^{A,C}(\%)$	$PD_{avg}^{A,D}(\%)$	$PD_{avg}^{B,C}(\%)$	$PD_{avg}^{B,D}(\%)$	$PD_{avg}^{C,D}(\%)$
Corredor de Circulação de Pessoal	0,0706	0,2902	9,8806	0,2197	11,0424	11,2868
Radiador R_1	–	–	100	–	–	–
Radiador R_2	0,0269	0,02154	9,9874	0,0054	11,1255	11,1195
Radiador R_3	0,0607	22,0769	18,0817	22,0028	21,9988	0,0033
Radiador R_4	88,1517	85,9211	46,2093	1,1856	1,1937	0,0083
Radiador R_5	60,4591	60,9258	37,8467	0,2909	0,2652	0,0256

A Tabela 7 e a Tabela 8 oferecem uma compreensão abrangente de como o posicionamento das fontes de ozônio dentro do hidrogenador afeta tanto as concentrações máximas quanto médias de ozônio. A análise é realizada nas simulações A, B, C e D.

Quanto às diferenças nas concentrações máximas de ozônio, o corredor de circulação de pessoal demonstra diferenças percentuais muito pequenas entre as simulações A e B (0,0239%) e entre as simulações A e C (0,0095%). A simulação D, quando comparada à simulação B dentro do corredor, revela uma concentração máxima de ozônio idêntica. No entanto, para o radiador R_1 , a simulação D exibe uma diferença de 100% na concentração máxima de ozônio em comparação com a simulação A para este radiador específico, porque a concentração obtida na simulação A é zero e na simulação D é 25 ppb. Os radiadores R_2 a R_5 mostram uma diferença máxima de aproximadamente 1,17% em todas as simulações devido à ativação das fontes de ozônio.

Quanto às diferenças na concentração média espacial de ozônio, o corredor de circulação de pessoal novamente mostra discrepâncias mínimas entre as simulações A e B (0,07%) e entre as simulações A e C (0,29%). No entanto, a simulação D, quando comparada às simulações A e B dentro do corredor, exibe diferenças significativas de 9,88% e 11,04% nas concentrações médias de ozônio. Os radiadores R_1 a R_5 agora mostram diferenças percentuais importantes para as concentrações médias, variando de 9,98% a 88,15%. Diferenças percentuais abaixo de 1% também são observadas.

Esses resultados destacam a influência crítica do posicionamento das fontes de ozônio dentro do hidrogenador, especialmente em áreas como o corredor de circulação de pessoal e especialmente nos radiadores. As concentrações médias mostram diferenças percentuais mais importantes, pois pontos de alta concentração são observados nos radiadores à medida que as fontes são ativadas, indicando que múltiplos sensores de ozônio por radiador podem ser necessários para monitorar adequadamente as concentrações de gás ao longo do tempo.

Utilizando o conhecimento adquirido das quatro simulações anteriores, foram realizadas duas simulações adicionais, denominadas E e F, para explorar o impacto das fontes de ozônio distribuídas por todos os setores do hidrogenador. Na Simulação E, foram ativadas 101 fontes distribuídas uniformemente ao longo de todos os 360 graus do hidrogenador nas barras estáticas. Na Simulação F, são introduzidas mais nove fontes que são ativadas simultaneamente, totalizando 110 fontes. Essa configuração nos permite investigar os efeitos da ativação de múltiplas fontes simultaneamente. As nove fontes introduzidas na Simulação F são mostradas nas Figuras 36 a 38, e informações detalhadas sobre suas posições, dimensões e valores de concentração de ozônio são fornecidas nas Tabelas 9 e 10.

Para tornar as simulações viáveis no *hardware* de computação disponível, foi necessário

fazer ajustes na resolução da malha na região das fontes. Foi permitido que a geração automática de malha do COMSOL funcionasse em toda a geometria, resultando em uma malha computacional consistindo de 6.042.019 elementos. Esse método possibilitou a execução das simulações utilizando 118 GB de RAM.

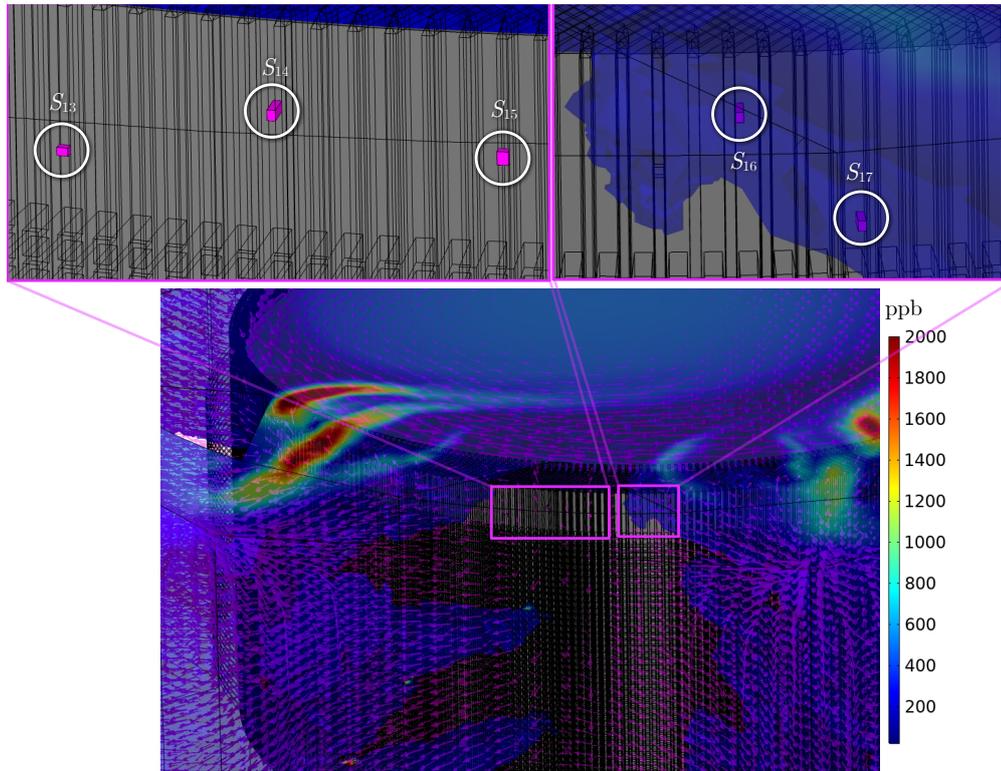
Os resultados das simulações E e F são apresentados nas Figuras 36-44. As Figuras 36–38 exploram a influência localizada das fontes ativadas, a Figura 39 fornece uma visão geral da distribuição de ozônio, a Figura 40 mostra uma visão superior da distribuição de ozônio e as Figuras 41–44 apresentam as distribuições de ozônio nas superfícies do radiador. Nas Figuras 36-40, a escala de cores varia de 20 a 2000 ppb para melhorar a visibilidade das variações de concentração. Consequentemente, a cor vermelha representa valores iguais ou superiores a 2000 ppb. Da mesma forma, nas Figuras 41-44, a escala de cores abrange de 0 a 300 ppb.

Tabela 9 – Localização de cada fonte de ozônio nas simulações E e F, sua classe de altura e setor.

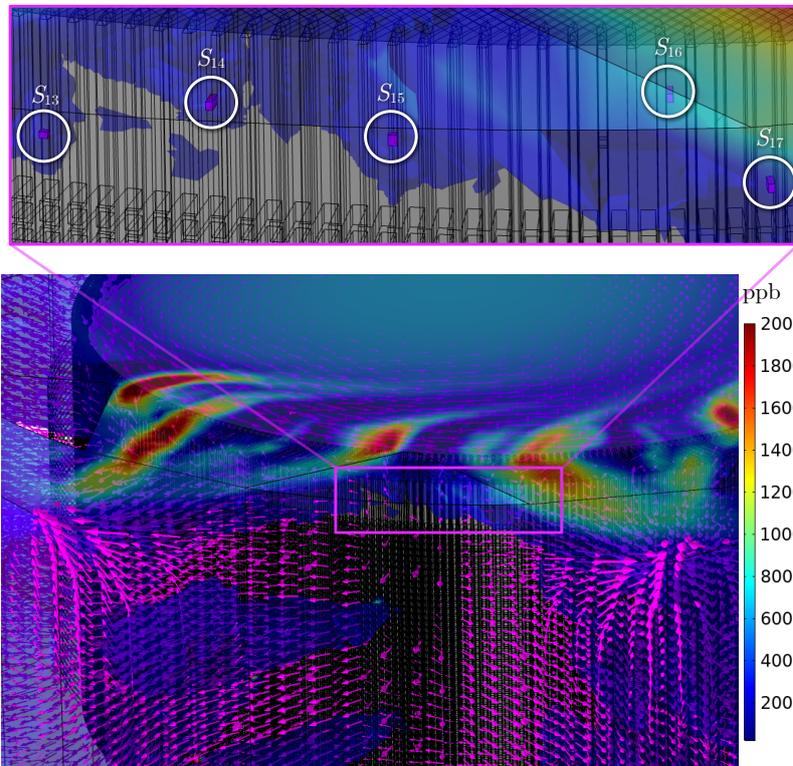
Fonte	Posição radial ρ (m)	Posição vertical z (m)	Classe de altura	Posição azimutal ϕ	Setor
S_{13}	3,942	3,524	superior	265°	R_1
S_{14}	3,911	3,624	superior	270°	entre R_1 e R_2
S_{15}	3,942	3,574	superior	275°	R_2
S_{16}	3,911	3,674	superior	280°	R_2
S_{17}	3,850	3,424	superior	285°	R_2
S_{18}	3,819	2,074	intermediaria	75°	R_5
S_{19}	3,819	1,574	intermediaria	75°	R_5
S_{20}	3,911	0,674	inferior	310°	R_2
S_{21}	3,911	0,574	inferior	310°	R_2

Tabela 10 – Volume e concentração média volumétrica de ozônio para cada fonte nas simulações E e F.

Fonte	Dimensões (mm)	Volume (mm³)	Concentração média volumétrica de ozônio (ppb)
S_{13}	20,2×15×15	4545	16.500
S_{14}	47,2×20×15	14.160	51.405,94
S_{15}	25×20,2×15	7575	27.500
S_{16}	47,2×20×15	14.160	51.405,94
S_{17}	47,2×20×15	14.160	51.405,94
S_{18}	60×20,2×10	12.120	44.000
S_{19}	30×20,2×10	6060	22.000
S_{20}	47,2×15×15	10.620	38.554,46
S_{21}	47,2×25×15	17.700	64.257,43

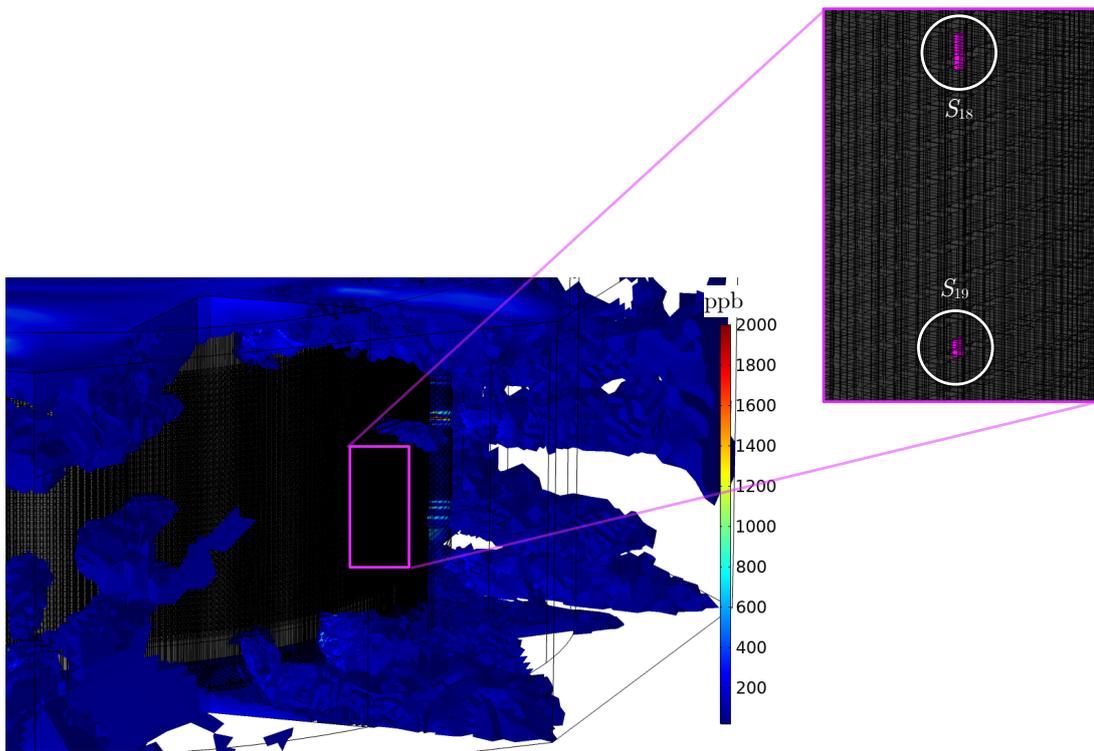


(a)

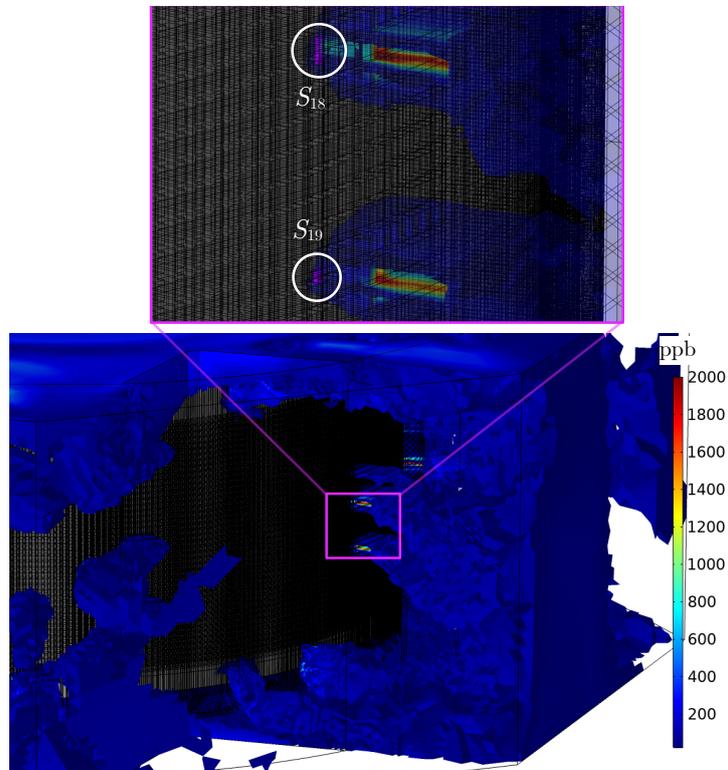


(b)

Figura 36 – Influência das fontes S_{13} a S_{17} nas simulações (a) E e (b) F.

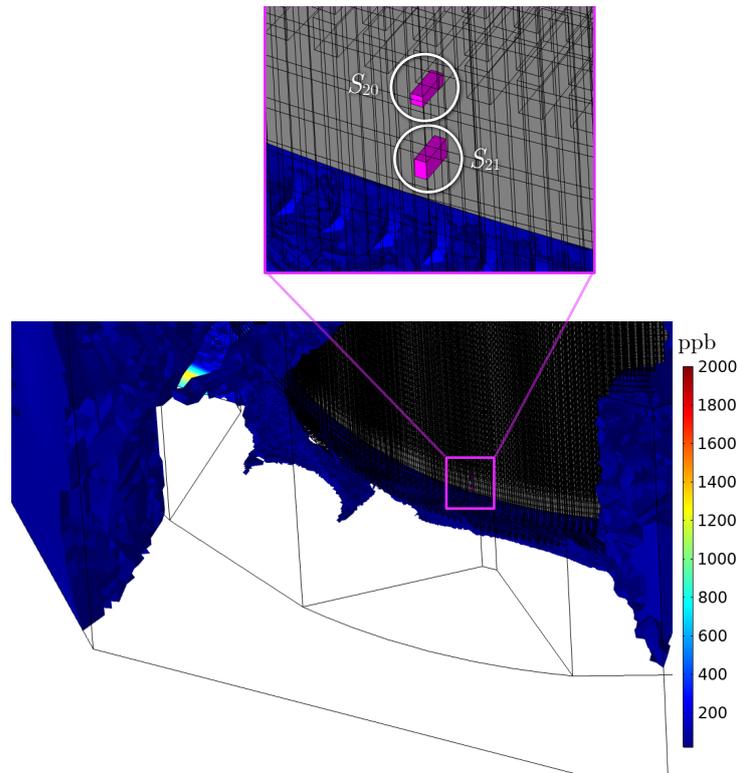


(a)

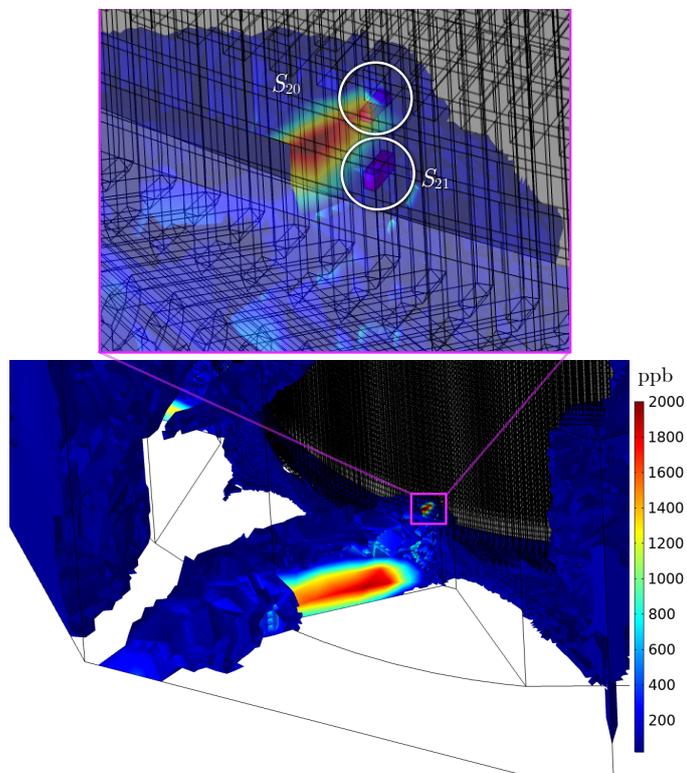


(b)

Figura 37 – Influência localizada na região das fontes S_{18} e S_{19} na simulação: (a) E e (b) F.

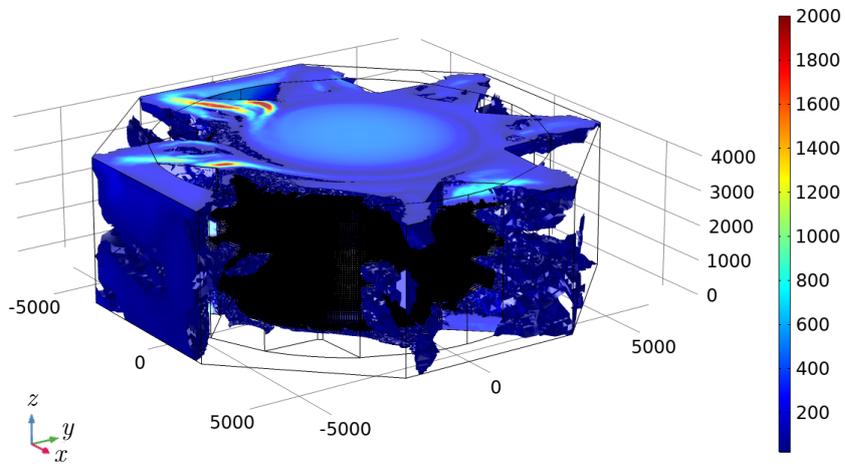


(a)

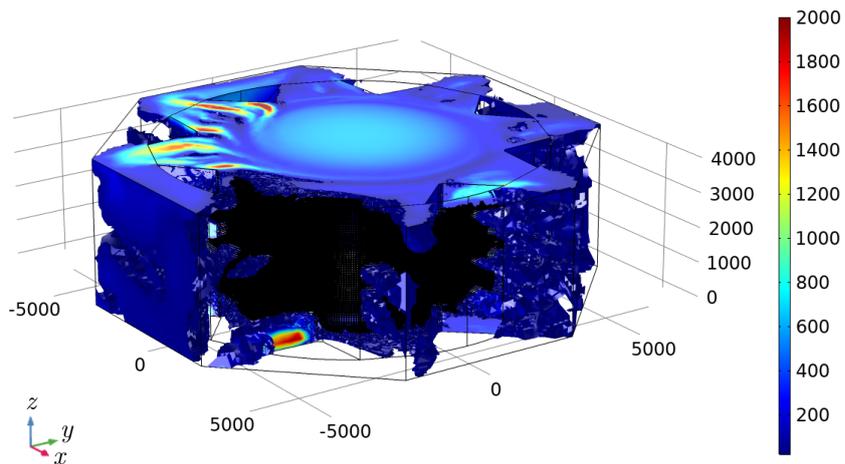


(b)

Figura 38 – Influência localizada na região das fontes S_{20} e S_{21} na simulação: (a) E e (b) F.

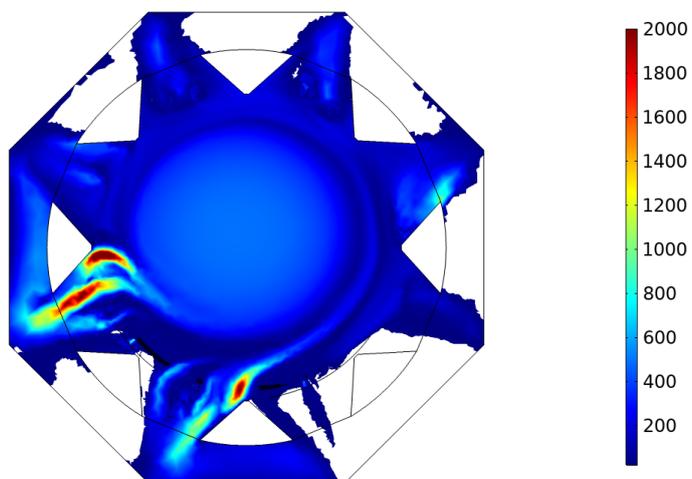


(a)

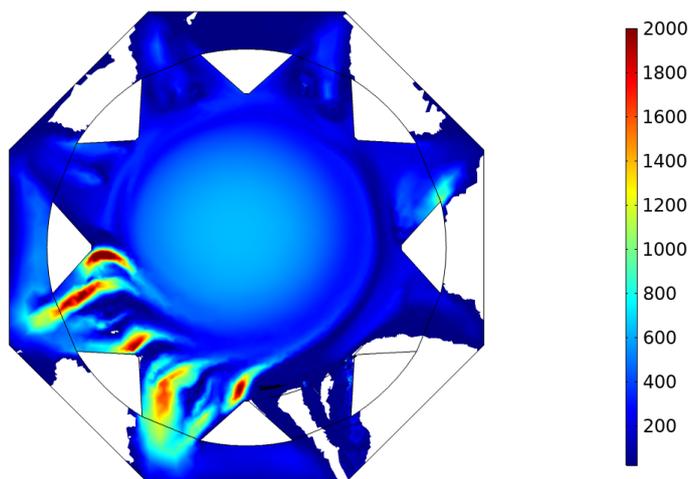


(b)

Figura 39 – Visão em perspectiva da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogador nas simulações: (a) E e (b) F



(a)



(b)

Figura 40 – Visão superior da concentração de ozônio (ppb) no modelo numérico do hidrogerador na simulação: (a) E e (b) F.

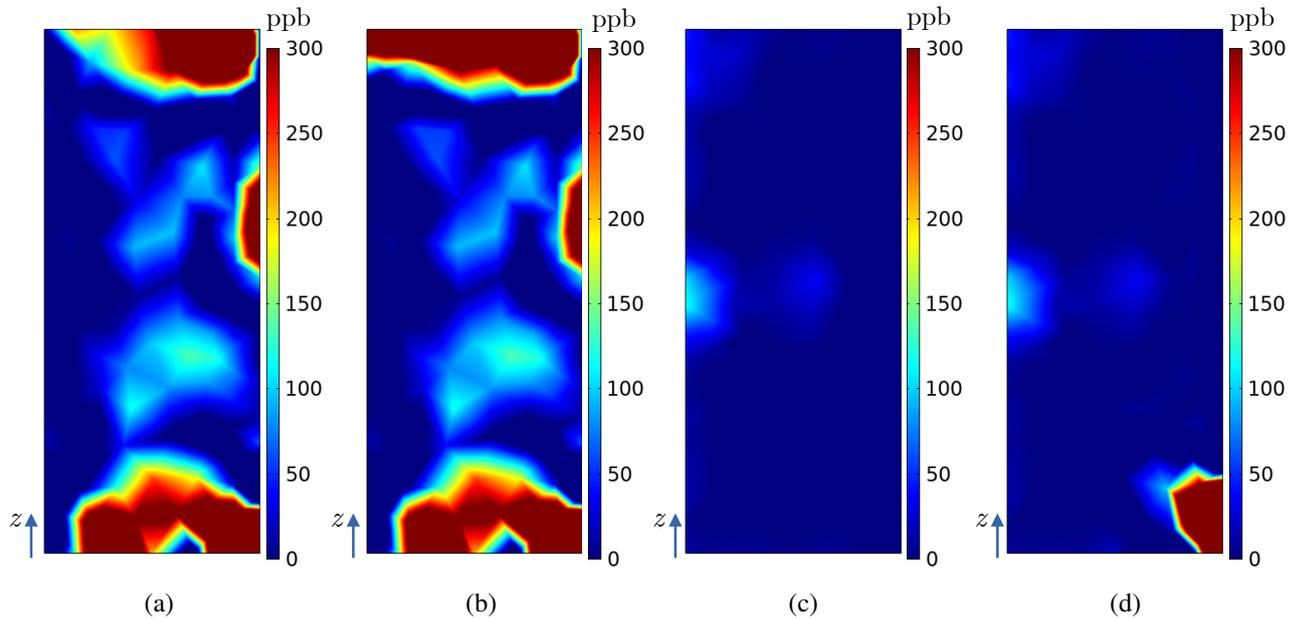


Figura 41 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_1 e R_2 no modelo numérico do hidrogerador: **(a)** R_1 (simulação E), **(b)** R_1 (simulação F), **(c)** R_2 (simulação E) e **(d)** R_2 (simulação F).

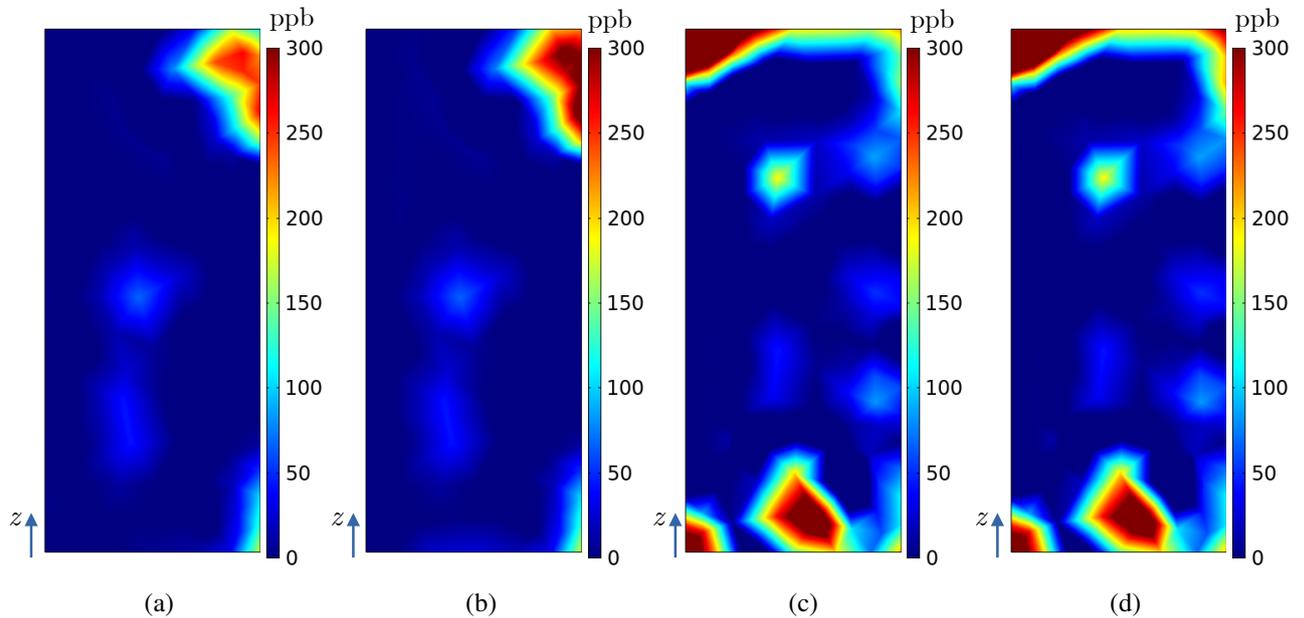


Figura 42 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_3 e R_4 no modelo numérico do hidrogerador: **(a)** R_3 (simulação E), **(b)** R_3 (simulação F), **(c)** R_4 (simulação E) e **(d)** R_4 (simulação F).

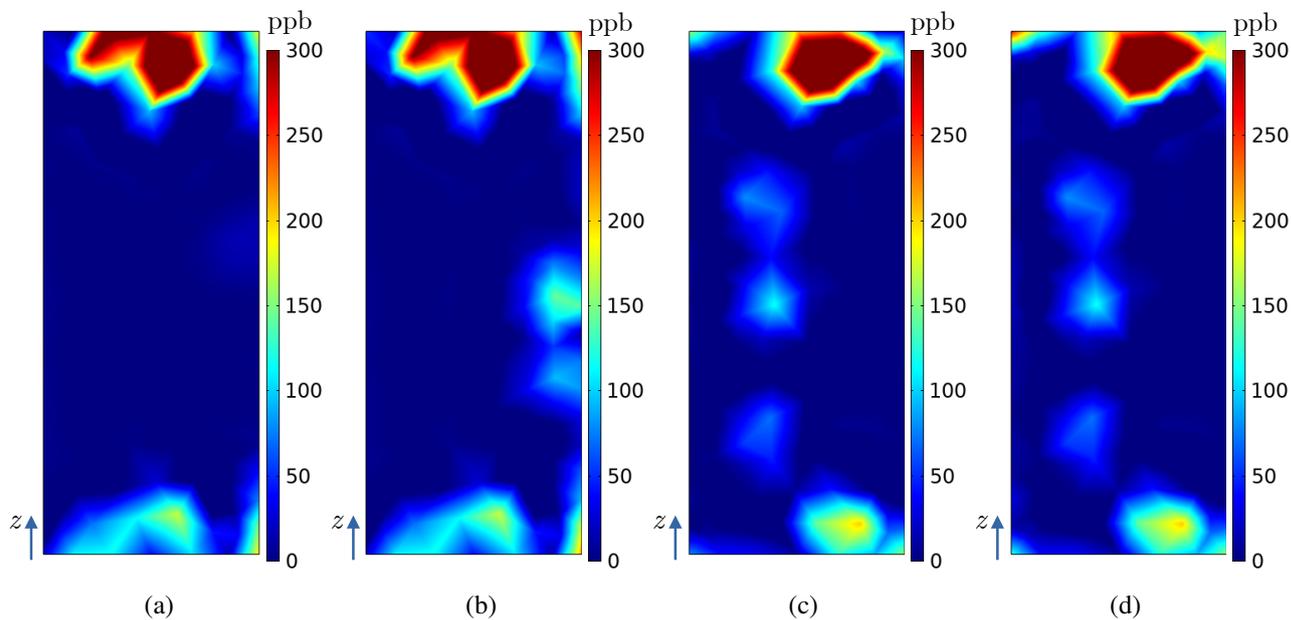


Figura 43 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_5 e R_6 no modelo numérico do hidrogerador: (a) R_5 (simulação E), (b) R_5 (simulação F), (c) R_6 (simulação E) e (d) R_6 (simulação F).

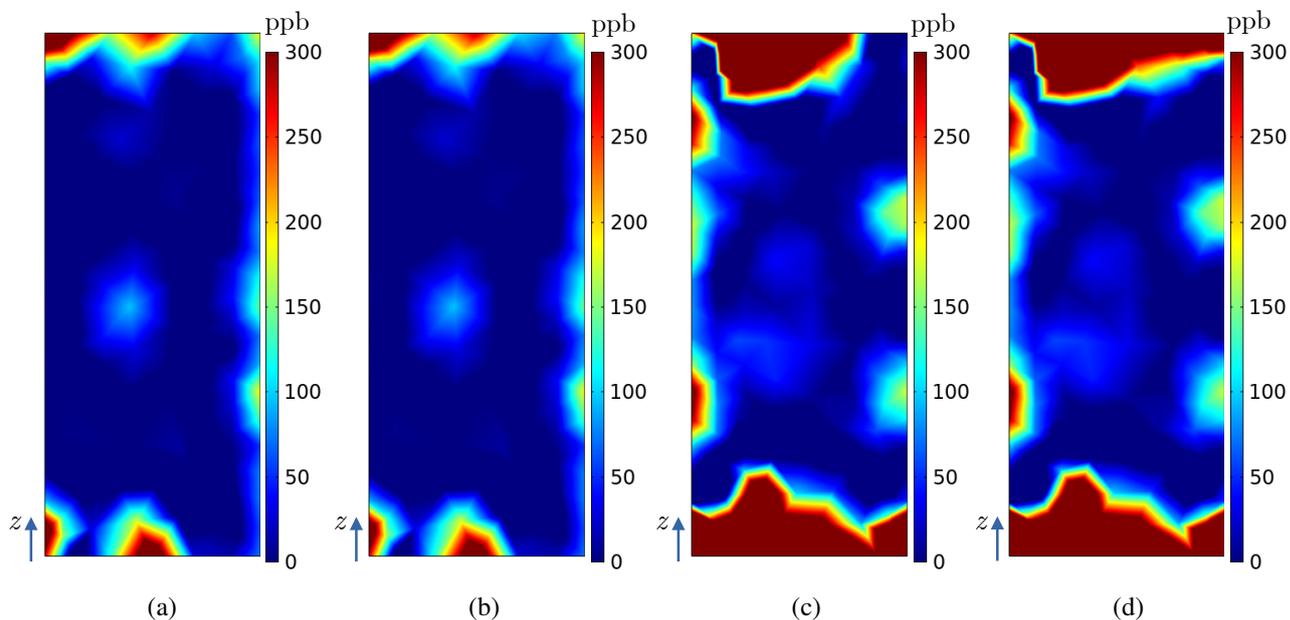


Figura 44 – Concentração de ozônio (ppb) nas superfícies dos radiadores R_7 e R_8 no modelo numérico do hidrogerador: (a) R_7 (simulação E), (b) R_7 (simulação F), (c) R_8 (simulação E) e (d) R_8 (simulação F).

Mesmo com várias fontes de ozônio ativadas ao mesmo tempo, ao analisar os resultados,

pode-se observar o mesmo padrão obtido nas simulações A a D, ou seja, mesmo com novas fontes de ozônio, a advecção do ozônio se adapta a um padrão geral de fluxo estabelecido, que é o mesmo em todas as simulações, já que a geometria do rotor e as condições de operação não foram alteradas. Isso pode ser explicado porque em todas as simulações (A a F), o campo de velocidade é o mesmo, já que a geometria do problema permaneceu inalterada. As fontes S_{13} a S_{17} estão posicionadas na região superior do hidrogerador, então elas são fortemente influenciadas pela velocidade azimutal e pelos componentes verticais (Figuras 36 e 39). Além disso, a fonte 13 está próxima à região intermediária entre R_1 e R_8 , o que contribui para que o ozônio gerado por ela seja transportado por trajetórias que alcançam a superfície de mais de um radiador.

As fontes S_{18} e S_{19} estão posicionadas na metade da altura do hidrogerador, então o ozônio gerado por elas é principalmente influenciado pela componente radial da velocidade, tendo sua maior relevância no setor em que estão posicionadas (Figuras 37, 39 e 40). Nesses casos, são observados pontos de alta concentração de ozônio nas superfícies dos radiadores, como discutido anteriormente, os quais tendem a estar alinhados radialmente às fontes que produzem os pontos de concentração no radiador. Isso sugere que vários sensores de ozônio podem ser necessários por radiador se o monitoramento adequado de DPs for pretendido, especialmente quando a identificação precisa de DPs é de interesse.

Por fim, as fontes S_{20} e S_{21} estão localizadas na parte inferior das barras do estator, o que significa que também há uma grande influência dos componentes verticais e azimutais da velocidade, então sua contribuição para a concentração de ozônio é observada em mais de um radiador (veja Figuras 38, 39 e 40).

Com as concentrações de ozônio na superfície dos radiadores obtidas nas simulações e mostradas nas Figuras 41–44, a Tabela 11 mostra a concentração máxima de ozônio obtida em cada superfície de radiador. Além disso, um gráfico polar mostrando a concentração máxima de ozônio em cada radiador é apresentado na Figura 45. O gráfico polar na Figura 45 é comparável aos perfis polares experimentais de ozônio publicados em [11–13], os quais indicam as máximas concentrações de ozônio medidas em cada radiador de sua máquina geradora do mundo real.

Tabela 11 – Concentração máxima de ozônio em cada radiador.

Radiador	Posição Angular ϕ	Concentração máxima de ozônio (ppb)
R_1	$247,5^\circ$	268,96
R_2	$292,5^\circ$	342,42
R_3	$337,5^\circ$	68,309
R_4	$22,5^\circ$	209,83
R_5	$67,5^\circ$	103,77
R_6	$112,5^\circ$	111,92
R_7	$157,5^\circ$	107,27
R_8	$202,5^\circ$	473,83

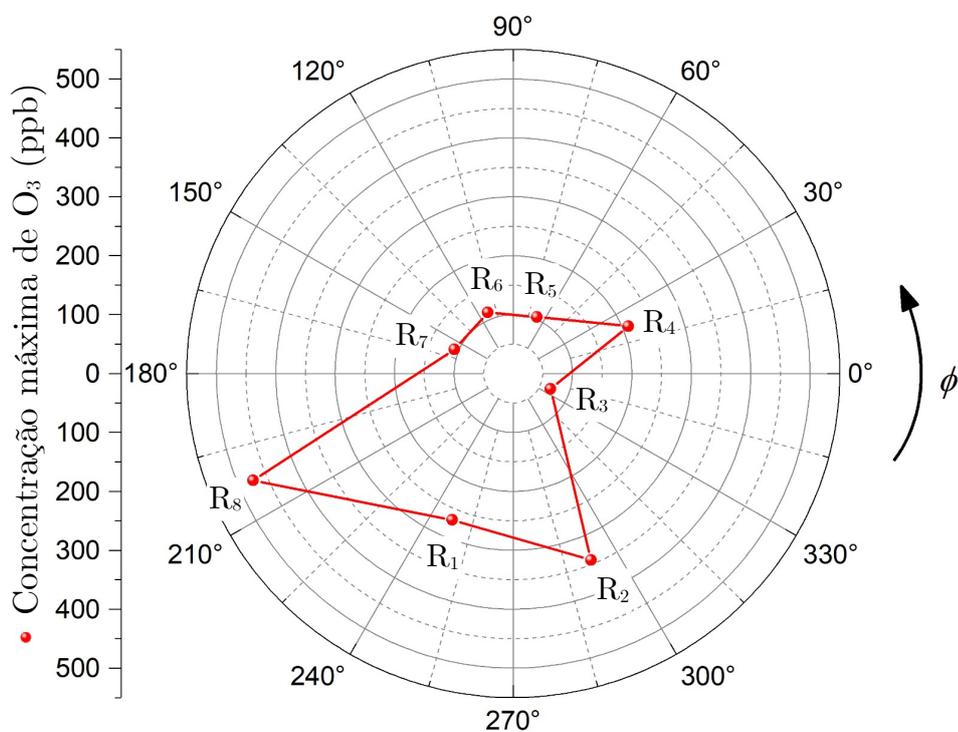


Figura 45 – Concentrações máximas de ozônio nos radiadores em função de ϕ (modelo numérico).

5 Conclusões

Neste trabalho, foram realizadas simulações de dinâmica de fluidos usando um modelo computacional desenvolvido neste artigo com base em uma máquina geradora completa da usina hidrelétrica brasileira de Campos Novos. Com o objetivo de compreender e analisar a dinâmica dos gases dentro da estrutura e verificar os níveis calculados de concentração de ozônio dentro e fora da máquina, foi desenvolvido um modelo de CFD representando uma unidade da usina hidrelétrica, utilizando um software baseado em elementos finitos. A análise dos resultados foi realizada qualitativa e quantitativamente a partir do rotor, com um raio de 3,8075 m e frequência de rotação de 200 RPM, e fontes de ozônio colocadas sobre a estrutura das barras do estator. A concentração volumétrica média de 33.000 ppb foi usada como base para fontes de 9090 mm³. Fontes com volumes maiores apresentam concentrações mais altas, e fontes com volumes menores apresentam concentrações mais baixas.

A influência da posição de uma fonte de ozônio na barra do estator de um hidrogerador foi avaliada. Verificou-se que fontes localizadas nas extremidades superior e inferior da barra do estator são mais influenciadas pela componente azimutal do campo de velocidade, enquanto aquelas localizadas na região central são mais influenciadas pela componente radial. Isso significa que, ao analisar a distribuição da concentração de ozônio na superfície dos radiadores, detectar ozônio nas regiões centrais do radiador indica a presença de fontes de ozônio alinhadas radialmente com o local de detecção. O ozônio detectado nas bordas direita e esquerda do radiador é influenciado pelos direcionadores de ar, o que torna a localização da fonte mais complicada. O ozônio detectado perto das bordas superior e inferior do radiador pode ser transportado para vários outros setores pela componente azimutal da velocidade. Em conclusão, a ocorrência de fontes de DPs (ozônio) em alturas intermediárias dentro do hidrogerador leva a concentrações de ozônio principalmente influenciadas pela componente radial da velocidade. Isso significa que podem ser necessários vários sensores de ozônio por radiador para localizar com precisão ocorrências de DPs em alturas intermediárias. No entanto, deve-se ter cuidado se houver fontes de DPs na parte inferior ou superior das barras do estator ou entre dois radiadores, pois o transporte de ozônio é governado pela componente azimutal da velocidade nesses casos.

Em trabalhos futuros, está planejado posicionar sensores eletroquímicos de ozônio nos radiadores da usina hidrelétrica brasileira Campos Novos para comparação com os resultados numéricos e monitoramento, mapeamento e localização de descargas parciais. Porém este trabalho abre portas para estudos das mais diversas áreas: 1) reconhecimento de padrões de

distribuição de ozônio, através de processamento de imagens via inteligência computacional obtidas nas superfícies dos radiadores; 2) localização exata das fontes de ozônio a partir das distribuições de ozônio nos radiadores; 3) ampliar o modelo fluidodinâmico desenvolvido neste trabalho e adicionar mais físicas ao problema como a térmica, eletrodinâmica ou mecânica e, ainda; 4) em posse de um poder computacional maior, melhorar a geometria do modelo numérico desenvolvido.

Referências

- [1] R. M. S. de Oliveira, G. G. Giroto, L. D. S. de Alcantara, N. M. Lopes, and V. Dmitriev, “Ozone transport in 311 MVA hydrogenerator: Computational fluid dynamics modelling of three-dimensional electric machine,” *Energies*, vol. 16, no. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/24/8072>
- [2] H. Ehya and J. Faiz, *Electromagnetic Analysis and Condition Monitoring of Synchronous Generators*. John Wiley and Sons, 2023.
- [3] C. Hudon, M. Belec, and M. Levesque, “Study of slot partial discharges in air-cooled generators,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1675–1690, 2008.
- [4] G. Stone and C. Maughan, “Vibration sparking and slot discharge in stator windings,” 07 2008, pp. 148–152.
- [5] J. Chen and J. H. Davidson, “Ozone production in the positive dc corona discharge: Model and comparison to experiments,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 22, pp. 495–522, 2002.
- [6] C. Hudon and M. Belec, “Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 297–319, 2005.
- [7] G. Stone and R. Wu, “Examples of stator winding insulation deterioration in new generators,” 08 2009, pp. 180 – 185.
- [8] M. Istad, M. Runde, and A. Nysveen, “A review of results from thermal cycling tests of hydrogenerator stator windings,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 890–903, 2011.
- [9] R. Rodriguez and L. Rux, “Ozone abatement in air-cooled hydroelectric generators. water resources technical pub,” 4 1997. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/512658>
- [10] E. Binder, A. Draxler, H. Egger, A. Hummer, H. R. Fuchs, H. Koglek, F. Müller, M. Drpic, M. Hoof, R. Käfer, and S. Lanz, “Entwicklungen und nachweisuntersuchungen von diagnosemethoden für wasserkraftgeneratoren,” *e&i Elektrotechnik und*

- Informationstechnik*, vol. 117, no. 12, pp. 794–805, dec 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/bf03161800>
- [11] M. Belec, S. Li, D. Nguyen, L. Lepine, C. Guddemi, D. Lessard-Deziel, T. Schwartz, and L. Lamarre, “Investigation and diagnosis of a 184-mva air-cooled generator heavily affected by slot partial discharge activity,” in *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2007, pp. 85–90.
- [12] M. B. C. G. Louis Lépine, Denise Lessard-Déziel and D. N. Nguyen, “Understanding ozone distribution inside stator core and measurements inside air-cooled generators to assess partial discharges problems,” in *Iris Rotating Machine Conference 2007*, 2007, pp. 1–10.
- [13] C. Hudon, M. Belec, and M. Levesque, “Using ozone measurements to diagnose partial discharge in generators,” *Hydroreview*, vol. 27, no. 7, 2008.
- [14] C. Millet, D. N. Nguyen, L. Lepine, M. Belec, D. Lessard-Deziel, and C. Guddemi, “Case study - high ozone concentration in hydro generators,” in *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 178–182.
- [15] L. Vouligny, C. Hudon, and D. N. Nguyen, “Design of mida, a web-based diagnostic application for hydroelectric generators,” in *2009 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference*, vol. 2, 2009, pp. 166–171.
- [16] G. Stone and H. Sedding, “Detection of stator winding stress relief coating deterioration in conventional and inverter fed motors and generators,” in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016, pp. 270–273.
- [17] N. Dehlinger and G. Stone, “Surface partial discharge in hydrogenerator stator windings: Causes, symptoms, and remedies,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 3, pp. 7–18, 2020.
- [18] M. Fratila, A. Benabou, A. Tounzi, and M. Dessoude, “Iron loss calculation in a synchronous generator using finite element analysis,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 2, pp. 640–648, 2017.
- [19] Deaconu, Sorin Ioan, Topor, Marcel, Tutelea, Lucian Nicolae, Nuca, Ilie, and Burduniuc, Marcel, “Wind or hydro homo-heteropolar synchronous generators: Equivalent magnetic circuit and fem analysis,” *MATEC Web Conf.*, vol. 210, p. 02008, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821002008>

- [20] A. de Barros, A. Galai, A. Ebrahimi, and B. Schwarz, “Practical modal analysis of a prototyped hydrogenerator,” *Vibration*, vol. 4, no. 4, p. 853–864, Nov 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/vibration4040048>
- [21] H. Syaeful Alam, I. Djunaedi, and D. Soetraprawata, “Thermal study for power uprating of 400 mw generator using numerical simulation,” *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 5, pp. 191–195, 08 2017.
- [22] J. Zhao, Y. Liu, and X. Xu, “Comparisons of concentrated and distributed winding pmsm in mv power generation,” in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 2437–2443.
- [23] C. Carounagarane, T. Chelliah, and D. Khare, “Analysis on thermal behavior of large hydrogenerators operating with continuous overloads,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, pp. 1–1, 12 2019.
- [24] A. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. Umans, *Electric Machinery*, ser. Electrical Engineering Series. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=YBKk4kWSle0C>
- [25] M. Uermori and J. Rocha, *Fundamentos de Projetos e Reabilitação de Geradores para Centrais Hidrelétricas*. Princípios de Manutenção e Reabilitação de Geradores Síncronos, 2012.
- [26] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dirhani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [27] M. M. Znidarich, “Hydro generator stator cores part 1 - constructional features and core losses,” in *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2008, pp. 1–8.
- [28] W. Oliveira, M. Uermori, J. Rocha, and C. Dias, “Barras roebel versus bobinas de múltiplas espiras: Impactos na reabilitação de hidrogeradores,” in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2011.
- [29] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines*, 2nd ed., ser. IEEE Press Series on Power Engineering. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, Aug. 2012.
- [30] G. C. Stone, A. Cavallini, G. Behrmann, and C. A. Serafino, *Practical partial discharge measurement on electrical equipment*. New York, NY: Wiley-IEEE Press, Nov. 2023.

- [31] G. C. Stone, C. V. Maughan, D. Nelson, and R. P. Schultz, “Impact of slot discharges and vibration sparking on stator winding life in large generators,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 14–21, 2008.
- [32] C. Sumereder, “Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008.
- [33] H. Illias, T. S. Yuan, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, and P. L. Lewin, “Partial discharge patterns in high voltage insulation,” in *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2012, pp. 750–755.
- [34] J. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, and J. Hayward, “Stator winding failures: contamination, surface discharge, tracking,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 577–583, 2002.
- [35] W. McDermid, “Ieee guide for the measurement of partial discharges in ac electric machinery,” in *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2012, pp. 659–660.
- [36] T. J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*. Press syndicate of the university of Cambridge, 2002.
- [37] R. M. S. . C. S. Andere, T. P. O. ; OLIVEIRA, “Análise magnetohidrodinâmica de oscilações em uma cuba de redução de alumínio pelo método fdm-2d,” in *12º SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 7º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, Belo Horizonte, MG, 2006.
- [38] Andere, T. P. O. ; DE OLIVEIRA, RODRIGO M. S., “Attenuation of magnetohydrodynamic oscillations in an aluminum reduction cell using periodic structures,” in *9th edition of the International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, Madrid.
- [39] F. H. Harlow and J. E. Welsh, “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface,” *Physics of Fluids*, vol. 8, pp. 2182–2189, 1965.
- [40] A. J. Chorin, “Numerical solution of the Navier-Stokes equations,” *Mathematics of Computation*, vol. 22, pp. 745–762, 1968.
- [41] M. N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*. CRC Press, second edition, 2000.

- [42] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and P. Nithiarasu, “Introduction to the equations of fluid dynamics and the finite element approximation,” in *The Finite Element Method for Fluid Dynamics*. Elsevier, 2014, pp. 1–29.
- [43] Z. Buntat, “OZONE GENERATION USING ELECTRICAL DISCHARGES: A comparative study between Pulsed Streamer Discharge and Atmospheric Pressure Glow Discharge,” Ph.D. dissertation, Loughborough University, February 2005.
- [44] R. M. S. de Oliveira, R. F. Zampolo, L. D. S. Alcantara, G. G. Giroto, F. H. R. Lopes, N. M. Lopes, F. S. Brasil, J. A. S. Nascimento, and V. Dmitriev, “Analysis of ozone production reaction rate and partial discharge power in a dielectric-barrier acrylic chamber with 60 Hz high-voltage electrodes: CFD and experimental investigations,” *Energies*, vol. 16, no. 19, 2023.
- [45] J.A. Cano-Ruiz and et al., “Removal of reactive gases at indoor surfaces: combining mass transport and surface kinetics,” in *Atmospheric Environment*, vol. 27, no. 13, Feb. 1993, pp. 2039–2050.
- [46] R. E. Shalin, *Polymer Matrix Composites*. Chapman & Hall, 1995.
- [47] Mueller F. X., Loeb L. and Mapes W. H., “Decomposition rates of ozone in living areas,” in *Environment Science & Technology*, vol. 7, 1973, pp. 342–346.
- [48] Simmons A. and Colbeck I., “Resistance of various building materials to ozone deposition,” in *Environment Technology*, vol. 11, 1990, pp. 973–978.
- [49] F. Cataldo and O. Ursini, “The role of carbon nanostructures in the ozonization of different carbon black grades, together with graphite and rubber crumb in an ir gas cell,” *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 15, no. 1, pp. 1–20, 2007.
- [50] Reiss, R., Ryan, P.B, Koutrakis, P, and Tibbetts, S.J, “Ozone reactive chemistry on interior latex paint,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 1906–1912, 8 1995.
- [51] G. C. Morrison, “Ozone-Surface Interactions: Investigations of Mechanisms, Kinetics, MassTransport, and Implications for Indoor Air Quality,” Ph.D. dissertation, University of California, December 1999.
- [52] A. G. Gusakov, A. G. Voropayev, M. L. Zheludkevich, A. A. Vecher, and S. A. Raspopov, “Studies of the interaction of copper with atomic and molecular oxygen,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 1, pp. 5311–5314, 1999. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/A905829J>

-
- [53] G. B. Schubauer, W. G. Spangenberg, and P. S. Klebanoff, “Aerodynamic characteristics of damping screens,” 1950.
- [54] P. Roach, “The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 8, no. 2, pp. 82–92, 1987. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142727X87900014>