



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di sistemi PEF per fluidi in quiete e in movimento destinati ad impianti di vinificazione

P. Casti, M. Salmeri

SVILUPPO DI SISTEMI PEF PER FLUIDI IN QUIETE E IN MOVIMENTO DESTINATI AD IMPIANTI DI VINIFICAZIONE

P. Casti, M. Salmeri (Università degli Studi di Roma Tor Vergata)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"

Progetto: Processi e macchinari industriali

Obiettivo: La tecnologia innovativa dei PEF per l'inattivazione microbica degli alimenti

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo dimensionale di una camera di trattamento per l'applicazione di campi elettrici ad alta intensità in condizioni dinamiche"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Francesca Bonfà

Responsabile scientifico Università degli Studi di Roma Tor Vergata: Prof. Marcello Salmeri



Indice

SOMMARIO.....	4
1 PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA DI UN SISTEMA DI TRATTAMENTO PEF PER LA VINIFICAZIONE IN CONTENITORI NON CONVENZIONALI (BOTTIGLIE DI VETRO).....	5
1.1 BREVE INTRODUZIONE E MOTIVAZIONI.....	5
1.2 PEF E VINIFICAZIONE: STATO DELL'ARTE.....	5
1.3 DETERMINAZIONE DELLE CONDIZIONI SUL CAMPO ELETTRICO.....	6
1.4 STUDIO SULLA GEOMETRIA DEGLI ELETTRODI.....	6
1.5 REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DELLA CAMERA DI TRATTAMENTO.....	8
1.6 SVILUPPO DEL MODELLO COMPUTAZIONALE.....	9
1.7 ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE DI CAMPO ELETTRICO.....	10
2 PROGETTAZIONE DI UNA CAMERA DI TRATTAMENTO CONTINUO PER L'APPLICAZIONE DI CAMPI ELETTRICI PULSATI (PEF) DESTINATA AD IMPIANTI DI VINIFICAZIONE DI TIPO INDUSTRIALE	18
2.1 BREVE INTRODUZIONE E MOTIVAZIONE	18
2.2 STUDIO DEI FATTORI DI PROCESSO.....	18
2.3 DIMENSIONAMENTO DELLA CAMERA DI TRATTAMENTO.....	19
2.4 DIMENSIONAMENTO DEL RACCORDO CAMERA DI TRATTAMENTO-TUBI	20
2.5 STUDIO DEI PARAMETRI FLUIDODINAMICI	21
SVILUPPO DEL MODELLO COMPUTAZIONALE.....	22
2.6 ANALISI DELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DI CAMPO ELETTRICO ALL'INTERNO DELLA CAMERA DI TRATTAMENTO	25
2.7 ANALISI FLUIDODINAMICA DEL FLUSSO DI VINO ALL'INTERNO DELLA CAMERA DI TRATTAMENTO.....	26
2.8 VINCOLI AGGIUNTIVI DI PROGETTAZIONE	30
3 CONCLUSIONI.....	31
4 BIBLIOGRAFIA.....	32

Sommario

Con il presente rapporto, vengono descritti i principali risultati relativi alla progettazione di sistemi PEF (Pulsed Electric Field) per applicazioni in campo vinicolo. L'obiettivo finale del progetto prevede la riduzione della quantità di solfiti nel processo di vinificazione, attraverso una tecnologia energeticamente efficiente come quella dei campi elettrici pulsati. La fattibilità tecnica della metodica verrà verificata nel presente lavoro attraverso la progettazione di due sistemi PEF complementari. Il primo è un sistema di trattamento PEF per la vinificazione in contenitori non convenzionali (bottiglie di vetro) che può essere utilizzato durante la fase di invecchiamento del vino, per stabilizzare e mantenere le sue caratteristiche organolettiche. Il secondo è un sistema di trattamento continuo per l'applicazione di campi elettrici pulsati (PEF) destinata ad impianti di vinificazione di tipo industriale che permette la riduzione dei principali agenti microbici presenti nel vino prima della fase di imbottigliamento.

1 Progetto di fattibilità tecnica di un sistema di trattamento PEF per la vinificazione in contenitori non convenzionali (bottiglie di vetro)

1.1 Breve introduzione e motivazioni

Il diossido di zolfo (SO_2), comunemente noto nel settore vinicolo come solfiti, è probabilmente uno degli additivi più versatili ed efficienti utilizzati nella vinificazione grazie alle sue proprietà antisettiche e antiossidanti. Questo composto è anche importante per ridurre al minimo la velocità di polimerizzazione fenolica e la perdita di colore durante l'invecchiamento del vino. Tuttavia, allergie causate da composti derivati dai solfiti, stanno diventando più frequenti, causando sintomi come mal di testa, nausea, irritazione gastrica e difficoltà respiratorie nei pazienti asmatici. Di conseguenza, la concentrazione massima legiferata di solfiti consentita nei vini è stata gradualmente ridotta. Per questo motivo, è fondamentale in una strategia di mercato globale di vinificazione competitivo, ridurre o addirittura eliminare l'uso di SO_2 come conservante e cercare nuove strategie più sane e sicure [1, 2].

La metodologia dei campi elettrici pulsati (Pulsed electric field, PEF) può essere utilizzata nella vinificazione come alternativa ai solfiti. La tecnologia PEF rappresenta una tecnica veloce, non termica e altamente efficace per l'inattivazione di microrganismi patogeni nel vino senza modifica della qualità del vino stesso (vedi rapporti sull'attività svolta nelle due annualità precedenti). Questa tecnologia comporta l'applicazione di impulsi di breve durata (ordine dei μs) di campo elettrico ad elevata intensità (fino a 70 kV/cm) su prodotti posti tra due elettrodi. La breve durata e l'alta intensità delle forze di campo causano l'elettroporazione delle membrane cellulari e l'inattivazione dei microrganismi presenti nel vino a causa della rottura irreversibile della loro membrana cellulare. L'efficacia del trattamento PEF dipende dalla matrice alimentare, dai microrganismi in essa presenti, e dalle condizioni di trattamento (vedi rapporto sull'attività svolta nell'annualità 2016).

In questo lavoro viene presentato uno studio di fattibilità di un sistema di trattamento PEF per la vinificazione in contenitori convenzionali (bottiglie di vetro). Partendo dallo stato dell'arte in materia di PEF e vinificazione, sono stati determinati i parametri di processo relativi al campo elettrico (intensità, durata degli impulsi, numero di impulsi) per garantire l'efficacia del trattamento PEF sul vino. È stato sviluppato poi un modello a elementi finiti per l'analisi della distribuzione di campo elettrico in relazione a geometria e materiale della camera di trattamento (bottiglia di vino) e alle caratteristiche dielettriche del prodotto in essa presente (vino).

1.2 PEF e vinificazione: stato dell'arte

Nell'ultimo decennio una serie di studi hanno verificato la potenziale applicazione della tecnologia PEF per migliorare la sicurezza e la qualità del vino. Puertolas et al. [3, 4] hanno studiato l'inattivazione dei principali microrganismi presenti nel vino (*Dekkera anomala*, *Dekkera bruxellensis*, *Lactobacillus hilgardii* e *Lactobacillus plantarum*) mediante PEF. Gli autori hanno osservato che sia nel mosto che nel vino, i lieviti erano più sensibili ai PEF dei batteri e che un trattamento di 186 kJ / kg a 29 kV/cm può ridurre del 99,9% i microrganismi *Brettanomyces* e *Lactobacillus* presenti, limitando il rischio di deterioramento del vino. L'inattivazione microbica ottenuta sarebbe sufficiente, secondo gli autori, per evitare la contaminazione e controllare la vinificazione durante l'invecchiamento del vino all'interno dei barili o nelle bottiglie. Su campioni di vino (Cote de Bordeaux, 2010) è stata raggiunta l'inattivazione totale (fino a 5 Log) di diversi ceppi di microrganismi, utilizzando un trattamento PEF di 20 kV/cm, con impulsi esponenziali di 10 μs [5].

Garde-Cerdán e colleghi [6] hanno dimostrato che quando il mosto è trattato con PEF, la concentrazione di solfiti può essere ridotta o addirittura eliminata senza alcun effetto importante sul contenuto di composti volatili del prodotto finale. Inoltre, l'assenza di solfiti in queste condizioni non ha effetti negativi sulle proprietà organolettiche del vino. Gli stessi risultati sono stati confermati anche relativamente al trattamento PEF dei mosti e delle bucce d'uva [7]. Uno studio italiano [8] relativo all'applicazione di PEF su bucce d'uva di Aglianico ha dimostrato gli effetti benefici sulle caratteristiche del vino. Ulteriori studi [4, 9, 10] hanno

confermato i vantaggi che la tecnologia PEF può portare alla vinificazione: aumento della concentrazione di polifenoli, quindi aumento delle proprietà antiossidanti del vino, riduzione dei tempi di macerazione, aumento dell'intensità di colore e preservazione, al contempo, delle altre proprietà organolettiche.

La capacità del trattamento PEF di inattivare i microrganismi senza causare alcun effetto deleterio su sapore, colore o valore nutritivo di mosto e vino, di migliorare l'estrazione dei composti fenolici, insieme al basso consumo energetico e ai brevi tempi di elaborazione richiesti, rende questa tecnologia una buona alternativa per ridurre la quantità di solfiti utilizzati nella conservazione del vino.

1.3 Determinazione delle condizioni sul campo elettrico

Sulla base dello stato dell'arte è possibile determinare i principali parametri di processo necessari all'inattivazione dei principali microrganismi presenti nel vino nel caso di trattamento statico. La Tabella 1 mostra i parametri di processo utilizzati dai singoli studi sul vino nei vari esperimenti e le riduzioni logaritmiche ottenute in relazione al microrganismo trattato.

Tabella 1. Parametri di processo per l'inattivazione di microrganismi presenti nel vino mediante PEF.

Fonte	Microrganismo	Campo elettrico (kV/cm)	Durata impulso (μ s)	Numero impulsi	Tempo di trattamento (ms)	Forma d'onda	Trattamento	Riduzione Logaritmica
[5]	Brettanomyces bruxellensis	20	10	400	4,00	Esponenziale	Statico	3,5
[5]	Oenococcus oeni	20	10	400	4,00	Esponenziale	Statico	4,0
[5]	Oenococcus oeni	20	10	400	4,00	Esponenziale	Statico	1,0
[5]	Pediococcus parvulus	20	10	400	4,00	Esponenziale	Statico	1,0

Sulla base dei dati ricavati dalla letteratura scientifica, in particolare dal lavoro di Delsart e colleghi [5] sul vino rosso Côtes de Bordeaux annata 2010, riportati in Tabella 1, è stato individuato un valore di intensità di campo elettrico pari a 20 kV/cm utilizzato per il trattamento in camere statiche di nostro interesse. Tale valore verrà considerato nei paragrafi successivi per verificare la fattibilità di un sistema di trattamento PEF per la vinificazione in bottiglie di vetro mediante analisi agli elementi finiti. In aggiunta al valore del modulo del campo elettrico si dovrà verificarne l'uniformità sul volume di fluido trattato.

1.4 Studio sulla geometria degli elettrodi

L'applicazione degli impulsi di tensione necessari alla generazione del campo elettrico pulsato necessita di elettrodi collegati alla sorgente di tensione, ovvero al generatore di impulsi.

Gli elettrodi devono aderire al volume della bottiglia in modo da minimizzare la distanza elettrodo bottiglia che genererebbe una diminuzione dell'intensità del campo elettrico all'interno della bottiglia (vedi risultati attività dell'annualità precedente). A tale scopo sono stati realizzati in SOLIDWORKS®, uno strumento software usato per il disegno tecnico, diverse tipologie di elettrodi.

Le tre diverse configurazioni di elettrodi ottenute sono state poi importate in ambiente COMSOL Multiphysics® [11] per verificarne l'efficacia utilizzando simulazioni ad elementi finiti per il calcolo del campo elettrico all'interno della bottiglia.

In Figura 1.1, sono mostrati due elettrodi realizzati come porzioni di superficie cilindrica di raggio pari al raggio della bottiglia, in modo da aderire alla superficie della bottiglia stessa. Sono indicati i valori del diametro e dell'altezza delle due porzioni di superficie. Gli elettrodi sono rappresentati, per semplicità, come elementi flottanti. Per motivi di sicurezza è preferibile collegare un elettrodo al generatore e l'altro a

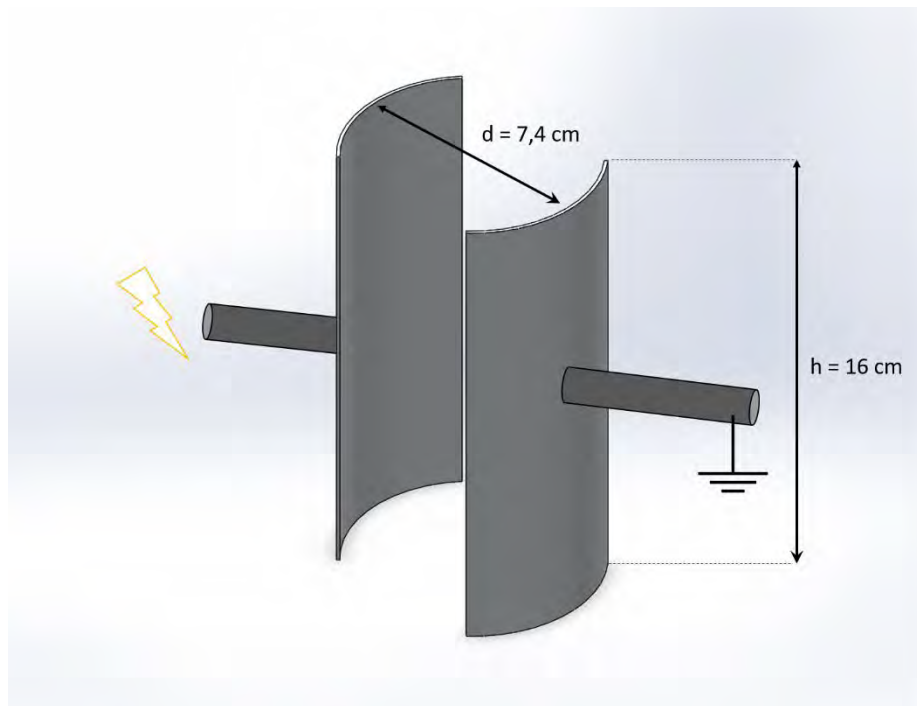


Figura 1.1. Geometria di una coppia di elettrodi realizzata in SOLIDWORKS®.

terra. Le tre configurazioni realizzate e analizzate sono messe a confronto in Figura 1.2 e sono costituite rispettivamente, da 2, 6, e 8 elettrodi. Gli elettrodi possono essere realizzati in acciaio inossidabile, materiale ampiamente utilizzato in letteratura per gli stessi scopi. Lucidarne la superficie può ridurre ulteriormente il rischio di rottura dielettrica del materiale dovuti ad aumenti locali dell'intensità di campo. Gli elettrodi ed i cavi di collegamento dovranno essere tenuti in posizione da un materiale isolante, come il plexiglas. Per essere in grado di sostenere il trattamento, il materiale utilizzato come isolante infatti deve avere una rigidità dielettrica superiore all'intensità del campo elettrico applicata in modo da evitare che gli atomi o le molecole del materiale subiscano un processo di ionizzazione a valanga, in grado di provocare un arco elettrico attraverso il materiale e l'alterazione permanente dello stesso. Per questo elettrodi, cavi e

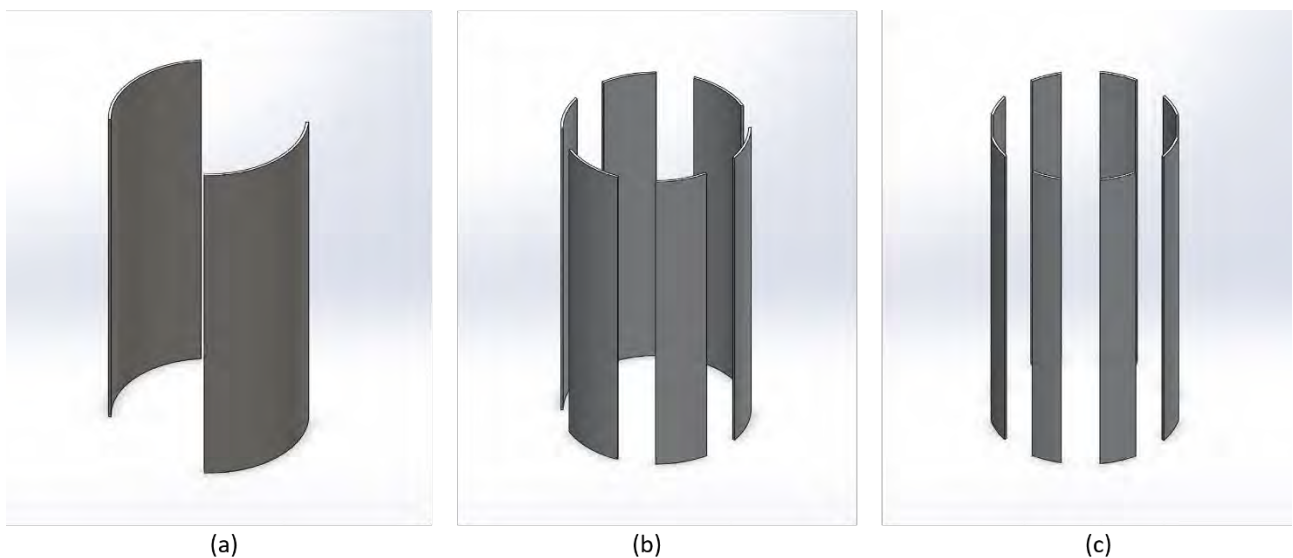


Figura 1.2. Confronto tra le tre configurazioni di elettrodi realizzate in SOLIDWORKS®.

strutture di sostegno possono essere immerse in oli minerali che raggiungono rigidità dielettriche dell'ordine dei MV/cm utilizzando un contenitore in plexiglass.

1.5 Realizzazione della geometria della camera di trattamento

La bottiglia di vetro svolgerà la duplice funzione di porta campione e camera di trattamento per il vino. La bottiglia, il vetro in essa contenuto e la camera contenente olio minerale sono stati realizzati in COMSOL Multiphysics® [11] utilizzando misure realistiche relative ad una bottiglia da 0,75 l e i materiali corrispondenti. I parametri maggiormente rilevanti ai fini della distribuzione del campo elettrico all'interno del vino sono diametro e spessore della bottiglia che sono stati fissati a 7,4 cm e 1 mm, rispettivamente. La geometria è stata realizzata mediante strutture cilindriche raccordate per approssimare meglio la geometria reale. La bottiglia è stata posizionata all'interno di un contenitore cilindrico contenente olio per trasformatori ed è stato scelto il vetro come materiale per la simulazione a elementi finiti. La geometria dei due elettrodi realizzata in SOLIDWORKS® utilizzando le posizioni nello spazio corrispondenti alla bottiglia è stata importata in COMSOL Multiphysics® in modo da aderire alla superficie della bottiglia. La geometria 3D della bottiglia realizzata è mostrata in Figura 1.3. All'interno è stato inserito un volume di fluido considerando uno spessore del vetro di 1 mm lungo le pareti laterali e di 2 mm alla base della bottiglia.

Le tre configurazioni di elettrodi realizzate sono mostrate in Figura 1.4 dopo essere state importate e adese alla bottiglia (in blu sono indicati gli elettrodi collegati a terra). La bottiglia è mostrata nelle tre configurazioni all'interno del contenitore cilindrico riempito con olio minerale (Transformer Oil della libreria di COMSOL). Il materiale impostato per gli elettrodi è l'acciaio inossidabile, Stainless W (UNS S17600), presente nella libreria di COMSOL.

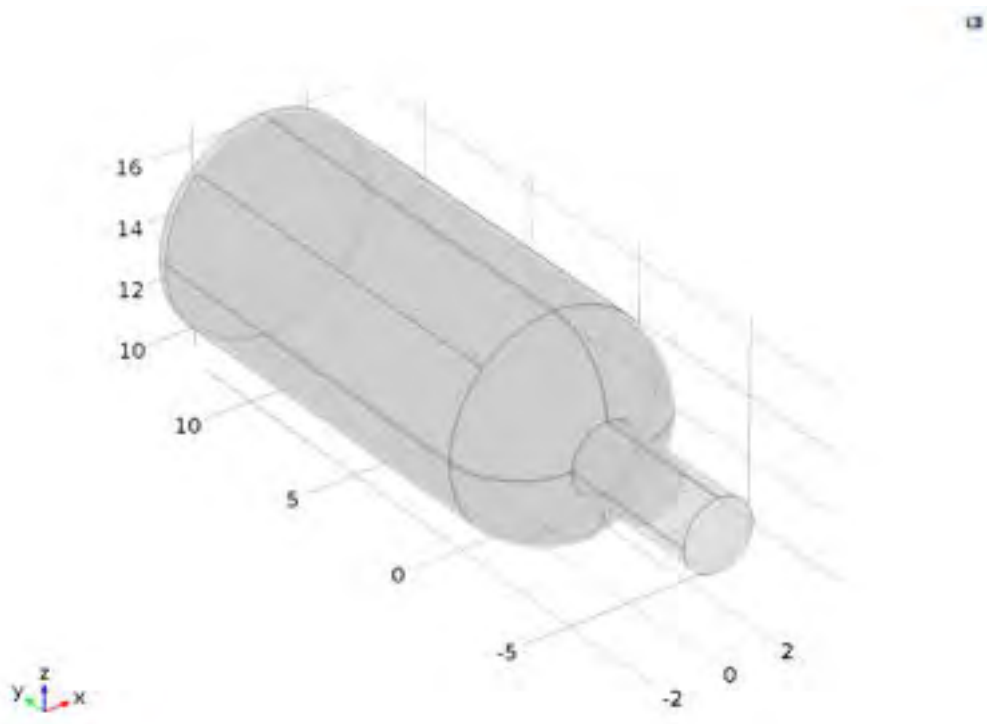


Figura 1.3. Geometria 3D della bottiglia di vino.

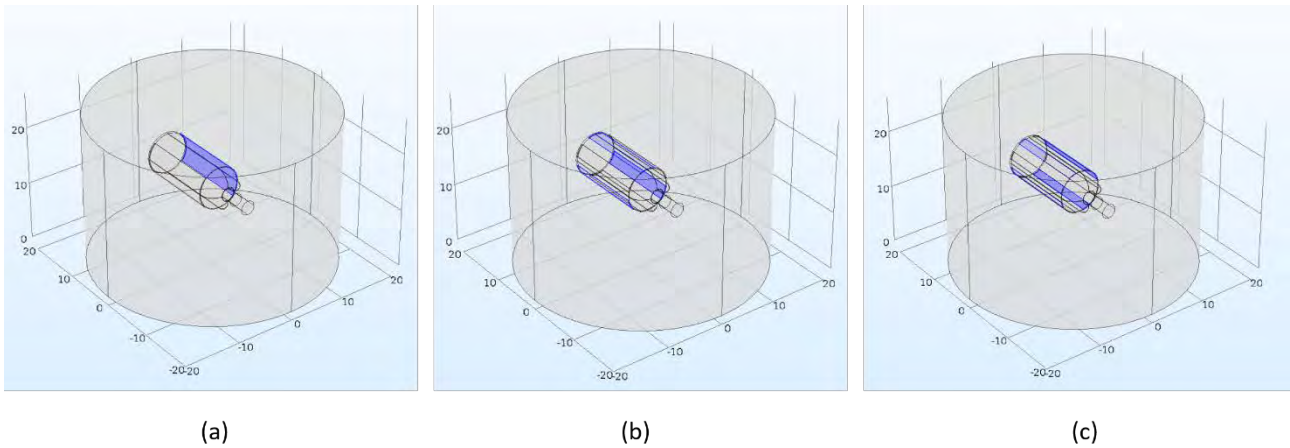


Figura 1.4. Geometria 3D degli elettrodi adesi alla bottiglia di vetro.

1.6 Sviluppo del modello computazionale

Per verificare valore e uniformità del campo elettrico all'interno della bottiglia ed i valori di intensità di campo elettrico massimo raggiunti all'interfaccia elettrodo-bottiglia è stato realizzato un modello computazionale per la soluzione delle equazioni di campo nei domini tridimensionali delle geometrie realizzate.

Una mesh di elementi tetraedrici è stata realizzata per la soluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali con il metodo degli elementi finiti. La dimensione dei tetraedri è stata scelta in relazione alla dimensione minima dei bordi degli elementi realizzati. Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 1.5.

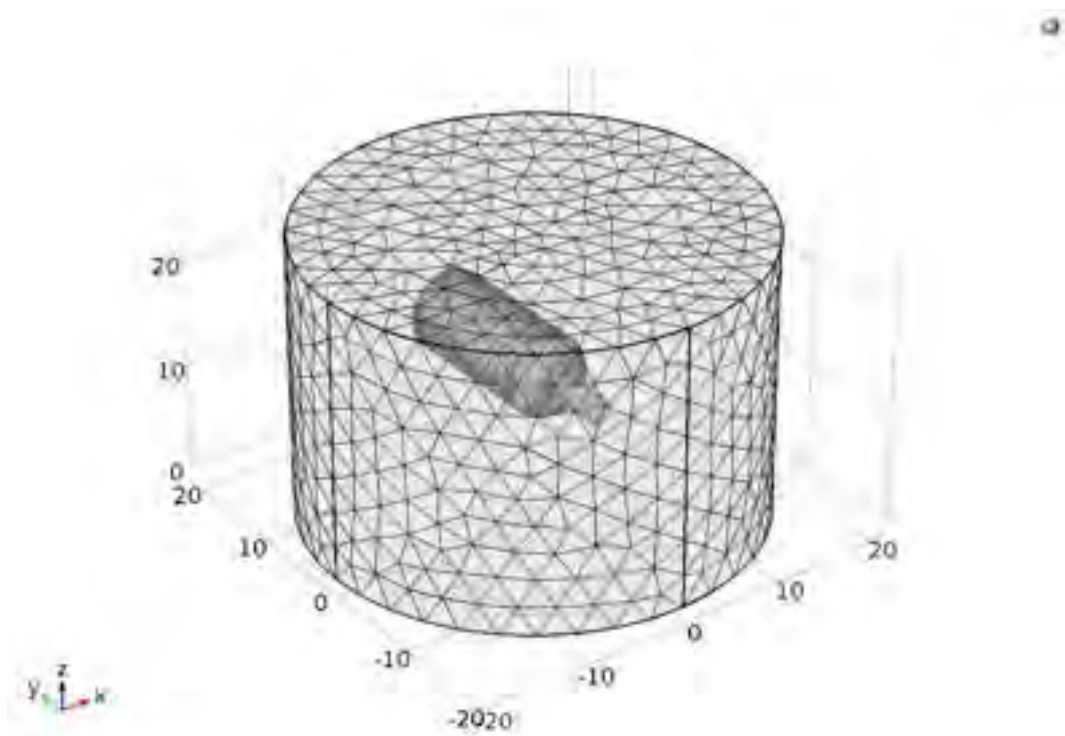


Figura 1.5. Mesh 3D di elementi tetraedrici.

Il campo elettrico in regime statico è stato simulato utilizzando il modulo AC/DC di COMSOL® (modulo elettrostatico e studio in regime stazionario) che risolve la legge di Gauss per il campo elettrico usando il

potenziale elettrico scalare come variabile dipendente su un dominio tridimensionale (per maggiori dettagli vedi rapporto sull'annualità precedente).

In aggiunta al vetro, per il fluido all'interno della bottiglia è stato selezionato l'acqua come materiale in quanto approssima da un punto di vista dielettrico il comportamento del vino.

Per le condizioni al contorno, sono stati selezionati i due elettrodi impostando terra e tensione parametrica V_0 . In aggiunta, è stata impostata la carica nulla su tutti i contorni della geometria (condizione al contorno) e il valore nullo del potenziale su tutti i domini (condizione iniziale).

1.7 Analisi della distribuzione di campo elettrico

Una serie di prove è stata effettuata variando il parametro V_0 , ovvero la tensione applicata ai capi degli elettrodi. Per ottenere valori di intensità di campo elettrico all'interno della bottiglia di 20 Kv/cm sono necessarie differenze di potenziale applicate ai capi degli elettrodi dell'ordine dei 100 kV.

A parità di tensione applicata sono stati confrontati i risultati ottenuti utilizzando le tre configurazioni di elettrodi analizzando la distribuzione spaziale del modulo del campo elettrico all'interno della bottiglia. I risultati sono mostrati in Figura 1.6 (a,b,c) per un set di piani di sezione e in Figura 1.6 (d,e,f) per un singolo piano, saturando la tensione a 20 kV per verificare il target di campo elettrico uniforme necessario per ottenere l'inattivazione microbica dei microrganismi presenti nel vino. I risultati mostrano che la configurazione a due elettrodi garantisce l'uniformità del campo intorno al valore di 20 kV, mentre le altre configurazioni non riescono ad ottenere la profondità di campo necessaria ad ottenere 20 kV/cm sull'intera sezione della bottiglia, a parità di tensione. Per questo motivo, la configurazione a due elettrodi è stata considerata per le analisi successive.

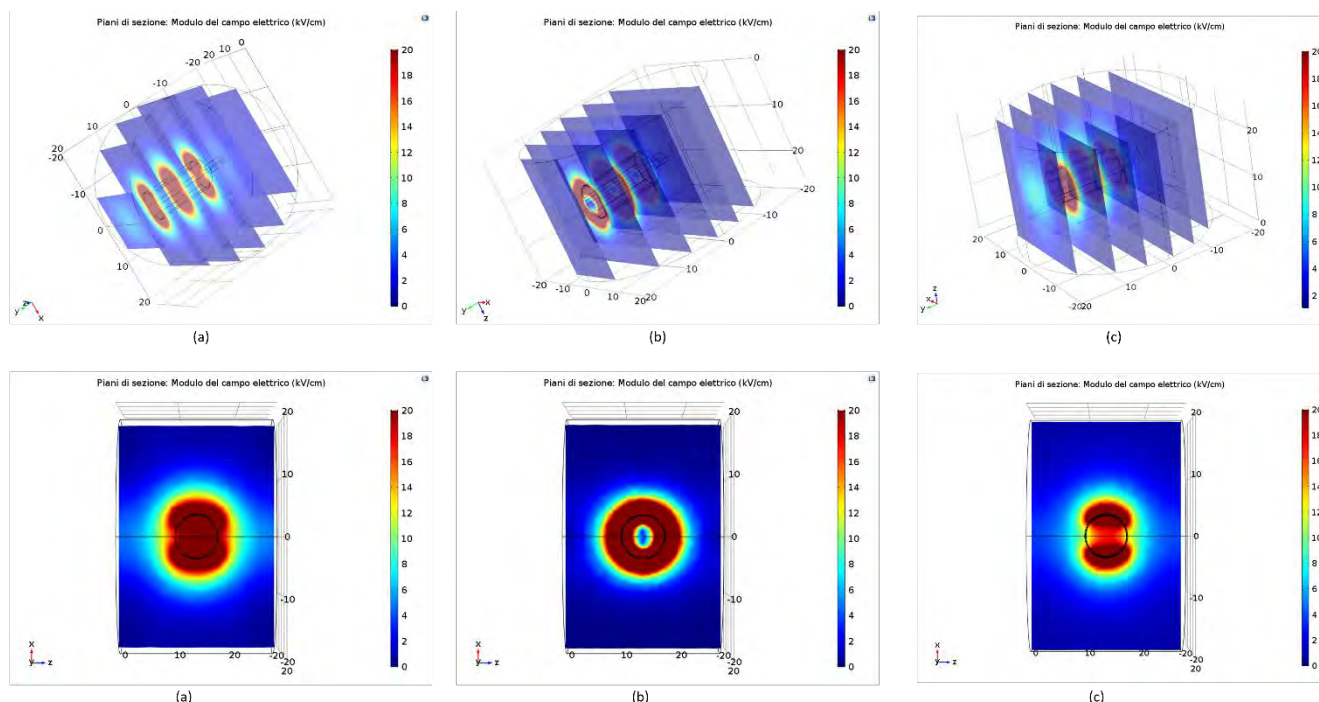


Figura 1.6. Confronto della distribuzione del modulo del campo elettrico a parità di tensione applicata per tre diverse configurazioni di elettrodi: (a,d) 2 elettrodi; (b,e) 6 elettrodi; (c,f) 8 elettrodi.

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati ottenuti relativamente alla distribuzione del modulo del campo elettrico sui un piano xy e xz per tensioni applicate ai capi degli elettrodi di 200 kV (Figure 1.7 e 1.8) e di 300 kV (Figure 1.9 e 1.10) per la configurazione a 2 elettrodi.

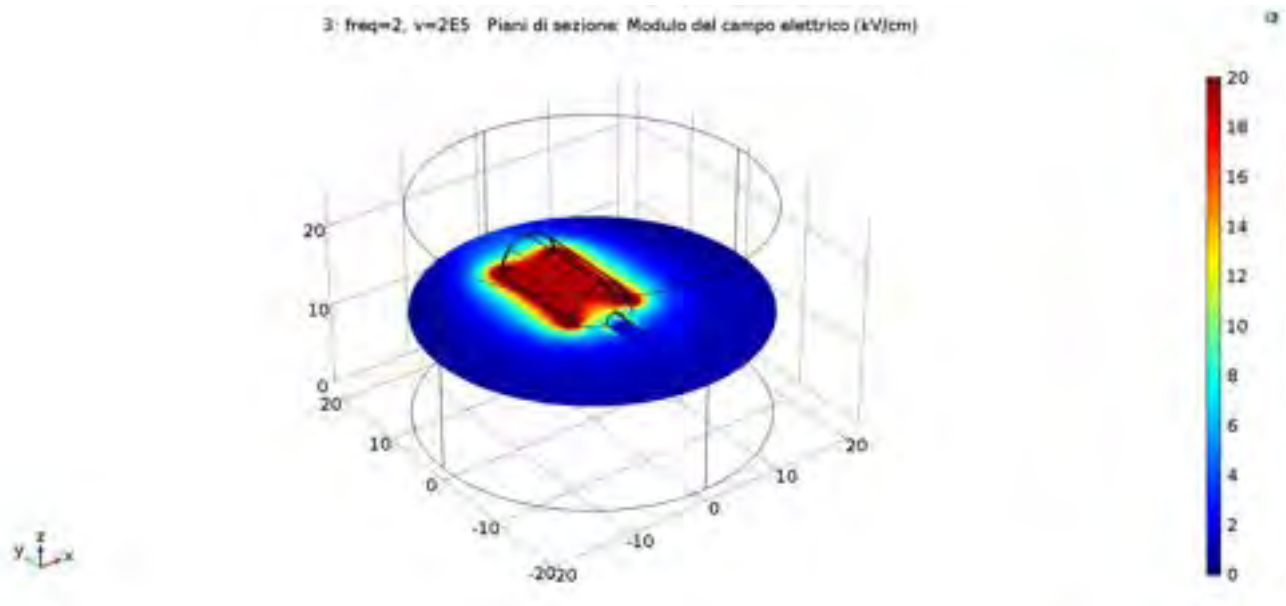


Figura 1.7. Distribuzione del modulo del campo elettrico su un piano xy per una tensione applicata di 200 kV.

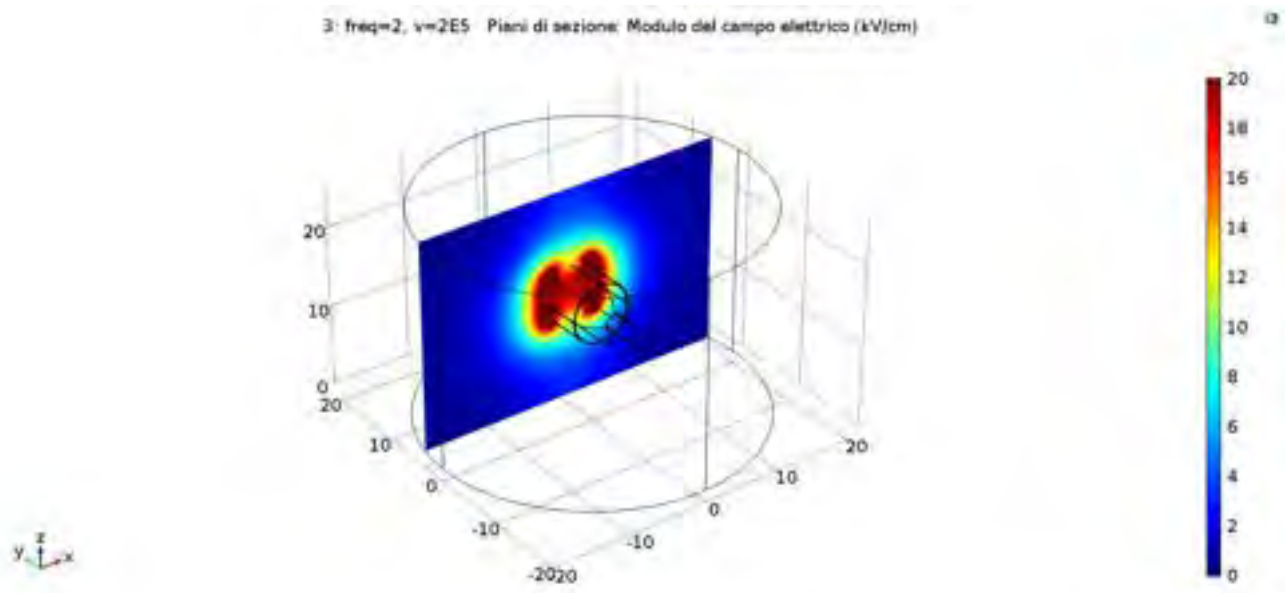


Figura 1.8 Distribuzione del modulo del campo elettrico su un piano xz per una tensione applicata di 200 kV.

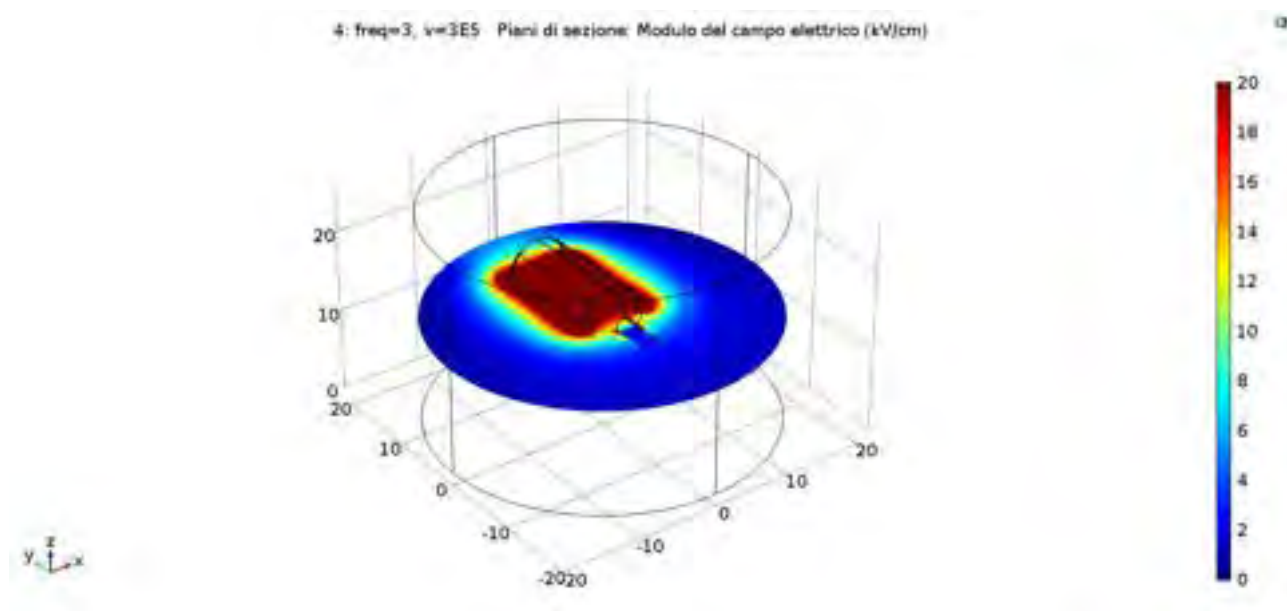


Figura 1.9. Distribuzione del modulo del campo elettrico su un piano xy per una tensione applicata di 300 kV.

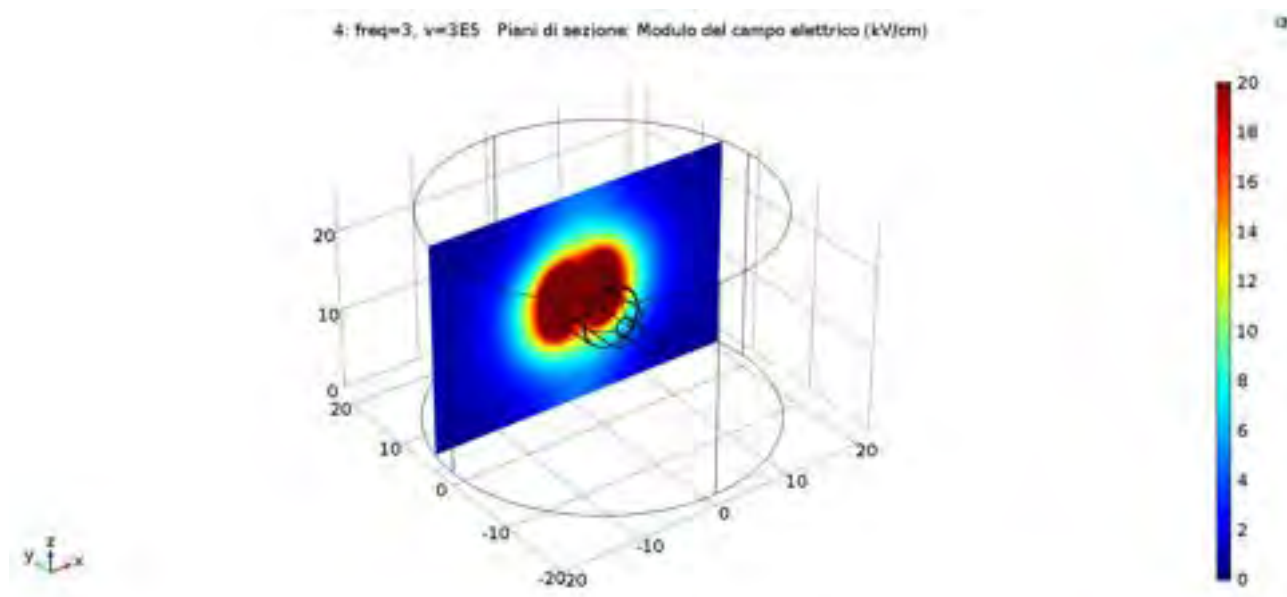


Figura 1.10. Distribuzione del modulo del campo elettrico su un piano xz per una tensione applicata di 300 kV.

Una differenza di potenziale di 300 kV garantisce il campo elettrico desiderato all’interno della bottiglia. In particolare, nel volume di vino contenuto all’interno della bottiglia i valori del modulo del campo elettrico hanno un valore mediano di 27,8 kV/cm e media (e deviazione standard) di 26,7 (8,7) kV/cm. Il range [min-max] è di [7,6 – 71,1] kV/cm, con il valore massimo ottenuto inferiore alla rigidità dielettrica dell’acqua che è pari a circa 150 kV/cm. Possiamo ragionevolmente ipotizzare che il vino abbia valori simili di rigidità dielettrica. In Figura 1.11 è mostrato l’istogramma ottenuto per i valori del modulo del campo elettrico nel volume di vino contenuto nella bottiglia.

I valori del modulo del campo elettrico maggiori si ottengono all’interfaccia elettrodo bottiglia, come mostrato in Figura 1.12, e sono maggiori all’interno dello spessore del vetro che nel vino, in coerenza con i valori di permittività dielettrica dei due materiali.

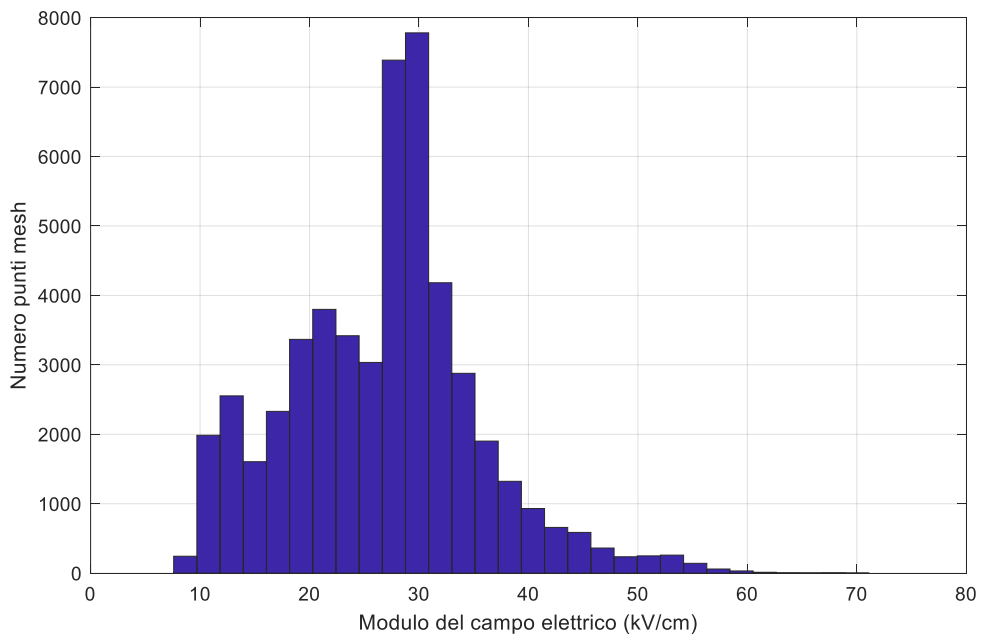


Figura 1.11. Istogramma dei valori modulo del campo elettrico nel volume di vino contenuto nella bottiglia.

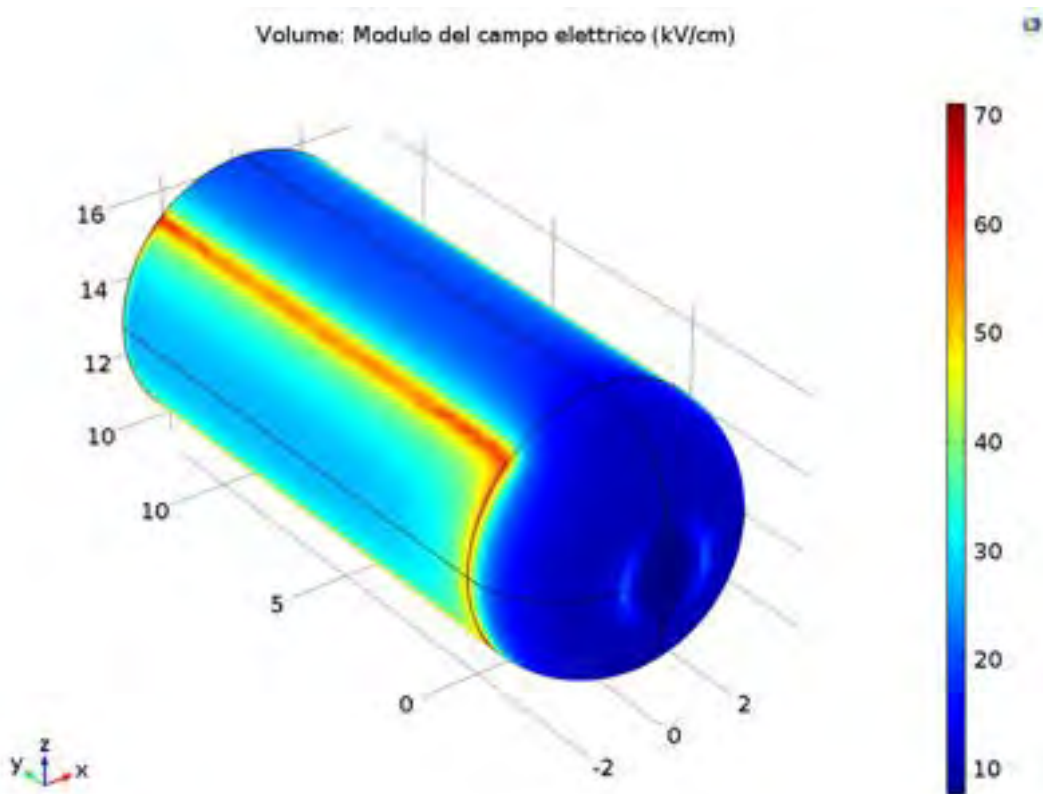


Figura 1.12. Distribuzione spaziale del modulo del campo elettrico nel volume di vino contenuto nella bottiglia.

Sul piano xz, il più critico dal punto di vista della distribuzione del campo elettrico, la distribuzione dei valori del modulo del campo elettrico un valore mediano di 20,4 kV/cm nel piano yz e media (e deviazione standard) di 19,1 (6,6) kV/cm. I risultati ottenuti sono mostrati nelle Figure 1.13 e 1.14 in termini di istogramma e distribuzione spaziale, rispettivamente.

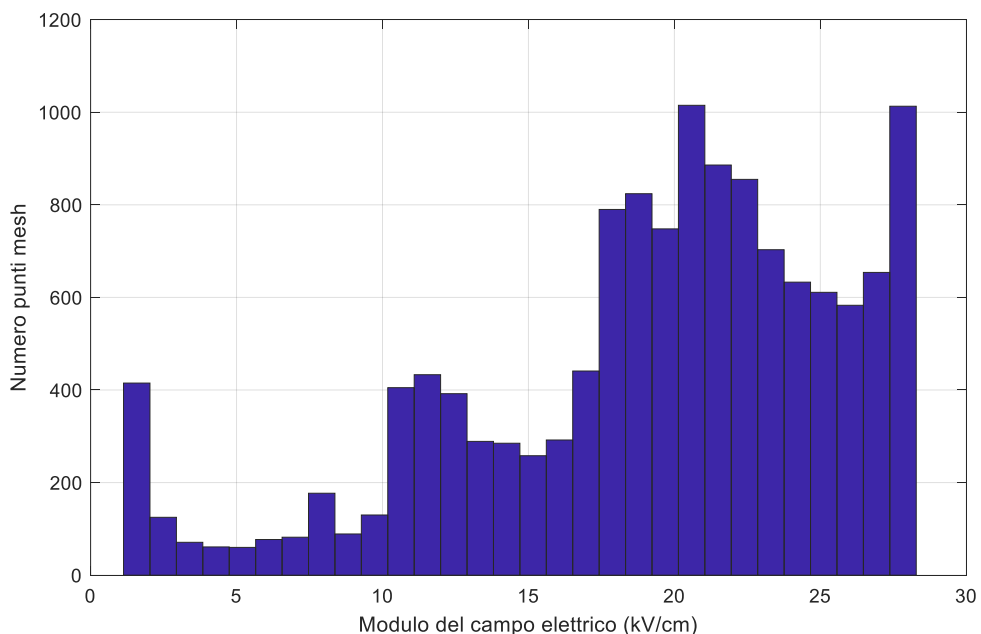


Figura 1.13. Istogramma dei valori del modulo del campo elettrico nel vino su un piano yz.

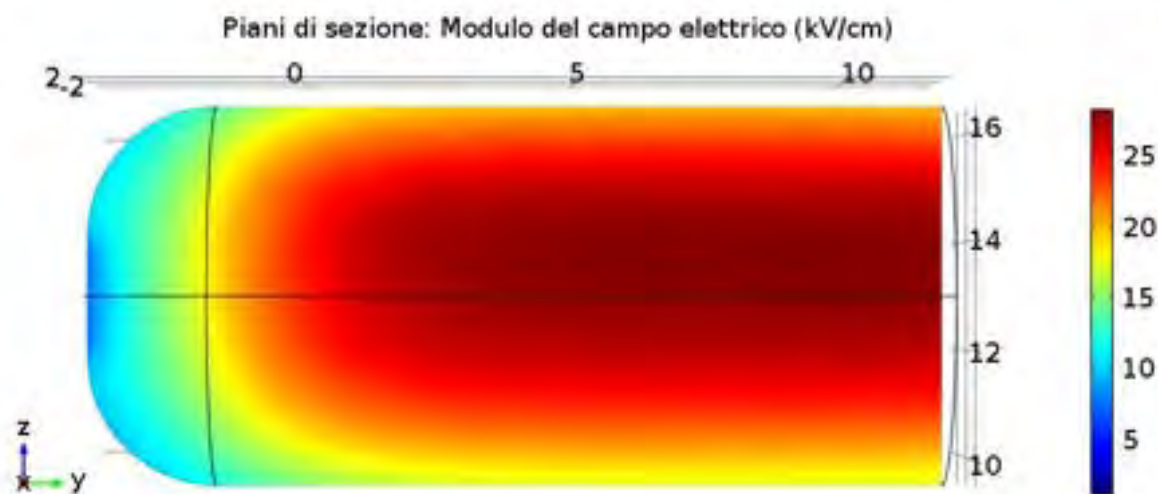


Figura 1.14. Distribuzione del modulo del campo elettrico nel vino su un piano yz.

Sul piano xz, il più critico dal punto di vista della distribuzione del campo elettrico, la distribuzione dei valori del modulo del campo elettrico un valore mediano di 20.4 kV/cm nel piano yz e media (e deviazione standard) di 19.1 (6.6) kV/cm. I risultati ottenuti sono mostrati nelle Figure 1.15 e 1.16 in termini di istogramma e distribuzione spaziale, rispettivamente. Gli stessi grafici sono mostrati nelle Figure 1.15-1.18 per i piani zx e xy con valori di modulo del campo elettrico mediamente più alti, quindi meno critici dal punto di vista dell'inattivazione microbica.

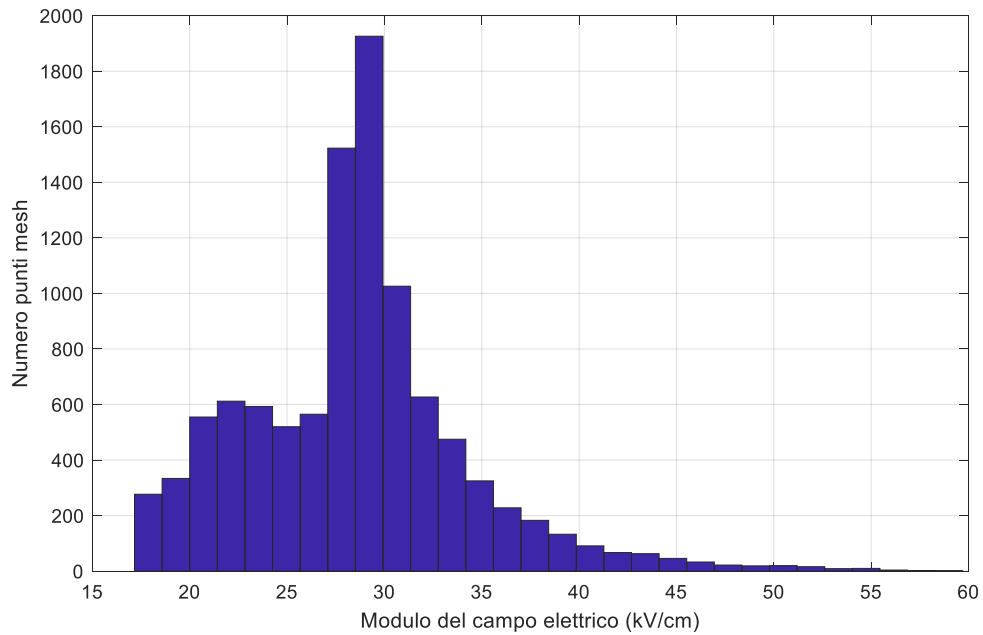


Figura 1.15. Istogramma dei valori del modulo del campo elettrico nel vino su un piano xz per una tensione applicata di 300 kV.

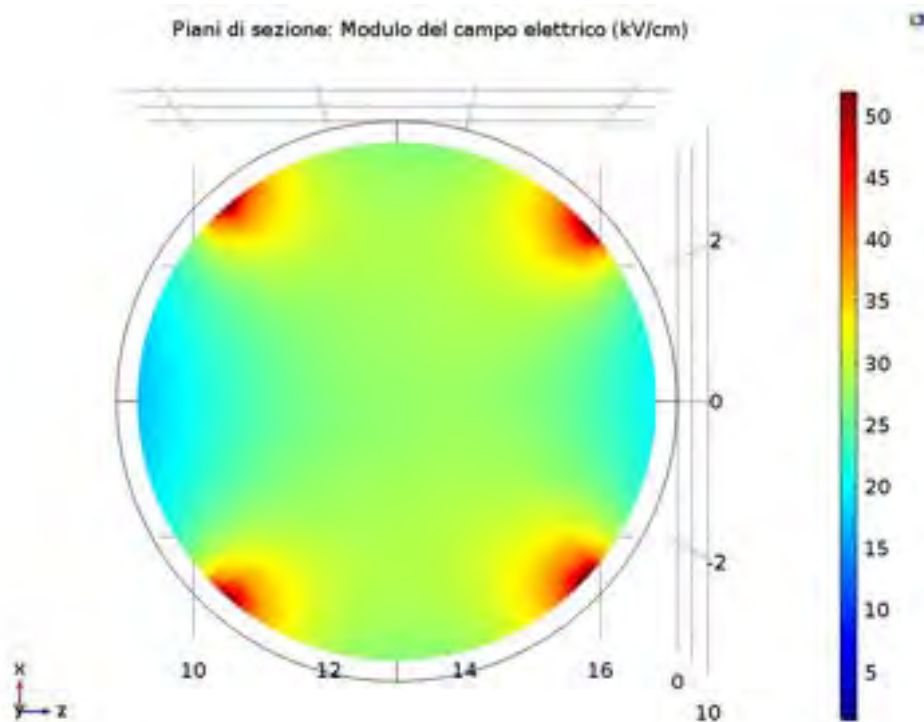


Figura 1.16. Distribuzione del modulo del campo elettrico nel vino su un piano xz per una tensione applicata di 300 kV/cm.

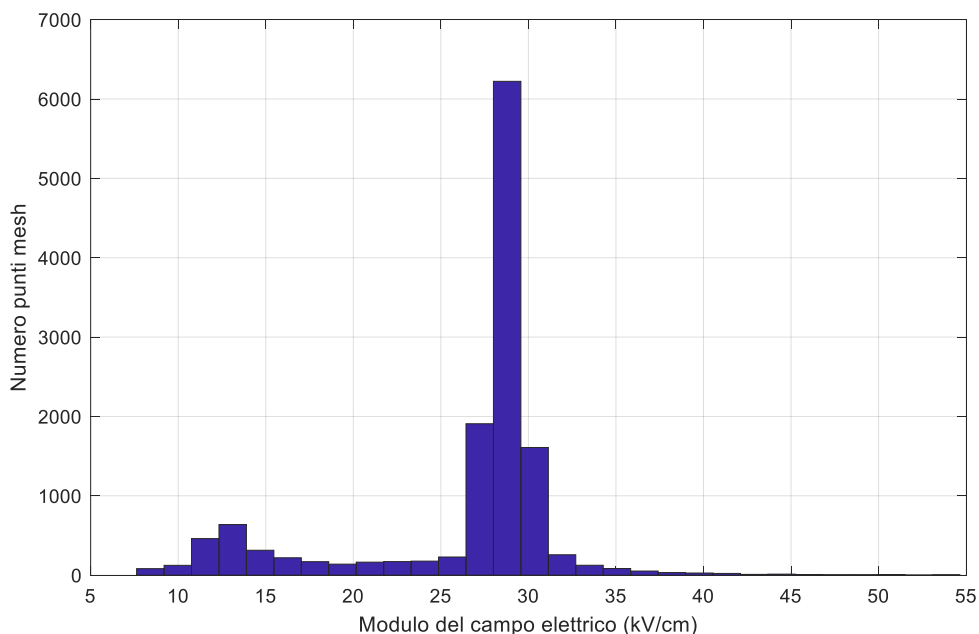


Figura 1.17 Istogramma dei valori del modulo del campo elettrico nel vino su un piano xy per una tensione applicata di 300 kV.

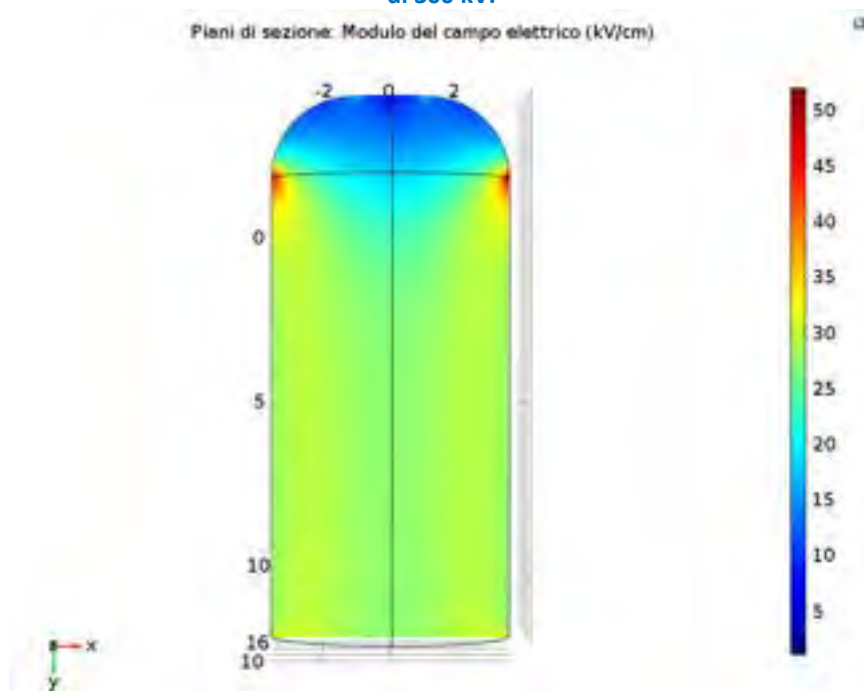


Figura 1.18. Distribuzione del modulo del campo elettrico nel vino su un piano xy per una tensione applicata di 300 kV.

All’interfaccia aria-vetro (vedi Figura 1.15) sono presenti dei picchi nel valore di campo elettrico maggiori di 1000 kV/cm, quindi superiori alla rigidità dielettrica del vetro. L’effetto di bordo può essere diminuito arrotondando la superficie degli elettrodi in modo da eliminare gli spigoli presenti e ridurre il rischio di archi elettrici. Tali valori, inoltre, potrebbero essere dovuti ad errori numerici presenti in virtù del salto tra dielettrici che genera una discontinuità nelle derivate e, come conseguenza, può causare problemi al solutore di COMSOL, il quale approssima la soluzione delle equazioni alle derivate parziali con un metodo numerico [12]. Relativamente al contenitore della bottiglia, la presenza dell’olio minerale ad elevata rigidità dielettrica ne garantisce la resistenza ad elevati campi elettrici.

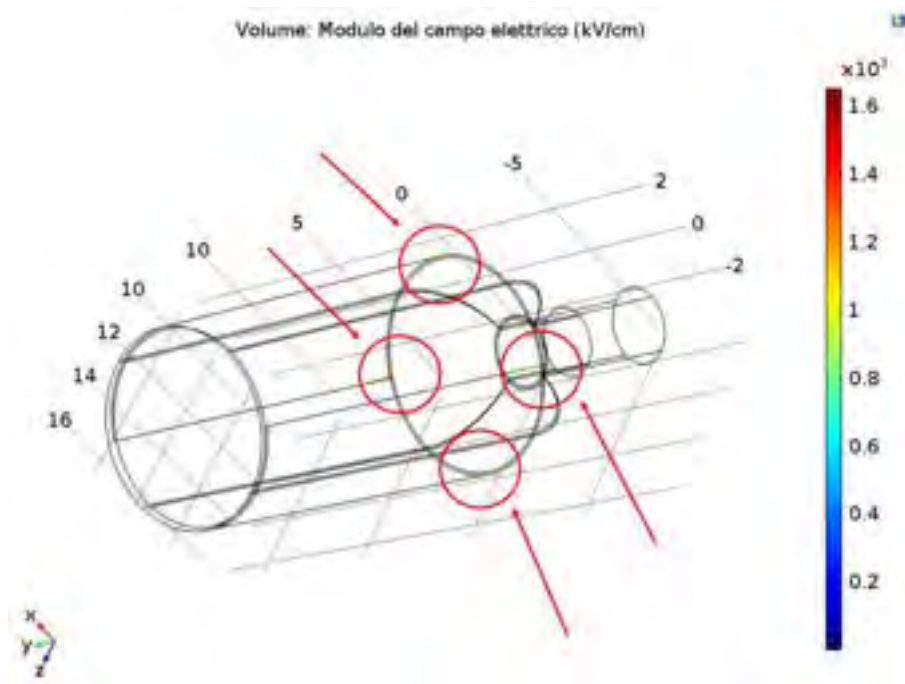


Figura 1.19. Zone critiche del campo elettrico nel vetro.

Il sistema PEF illustrato, sebbene realizzabile dal punto di vista tecnico, deve essere verificato dal punto di vista del risparmio energetico in virtù delle grandi potenze richieste ai generatori elettrici.

2 Progettazione di una camera di trattamento continuo per l'applicazione di campi elettrici pulsati (PEF) destinata ad impianti di vinificazione di tipo industriale

2.1 Breve introduzione e motivazione

Per impianti di vinificazione orientati ad applicazioni industriali, dove è richiesto il trattamento di maggiori volumi di fluido, il trattamento PEF del vino necessita di camere di trattamento continuo, da applicare prima dell'imbottigliamento. Nell'attività dell'annualità precedente sono state analizzate diverse tipologie di camere per il trattamento continuo: a facce parallele, coassiale e co-lineare. Nella presente attività verrà progettata una camera di trattamento continuo a facce parallele. In aggiunta allo studio della velocità di scorrimento del vino, la geometria della camera è stata ottimizzata dal punto di vista elettrico e fluidodinamico, per garantire, insieme all'uniformità del campo elettrico generato, anche il trattamento completo del volume di vino in moto attraverso la camera.

2.2 Studio dei fattori di processo

Definito il prodotto da trattare, vino, i principali microrganismi da inattivare e, conseguentemente, l'intensità del campo elettrico ed i fattori di processo (durata del trattamento e durata degli impulsi) necessari ad ottenerne l'inattivazione sono stati ricavati dalla letteratura scientifica.

In particolare, è stato considerato il lavoro di Beveridge e colleghi [11] sul vino Sauvignon Blanc ad una concentrazione alcolica del 12,5% realizzato utilizzando in sistema PEF di tipo continuo. Gli autori hanno trattato mediante PEF un tipo di lievito, *Zygosaccharomyces bailii* (MUCL 27812), e un batterio Gram positivo, *Lactobacillus brevis* (LMG 16322), comunemente presenti nel vino ottenendo la disattivazione completa dei microrganismi. Durata e numero di impulsi utilizzati per ottenere tale inattivazione sono indicati in Tabella 2. Gli autori hanno anche confrontato l'efficacia di impulsi rettangolari bipolari e monopolari riportando una maggiore inattivazione microbica relativamente agli impulsi rettangolari monopolari, che sono stati quindi considerati nel presente lavoro.

Tabella 2. Parametri di processo per l'inattivazione di microrganismi presenti nel vino mediante PEF.

Fonte	Microrganismo	Campo elettrico (kV/cm)	Durata impulso (μ s)	Numero impulsi	Tempo di trattamento (ms)	Forma d'onda	Trattamento	Riduzione Logaritmica
[13]	<i>Lactobacillus brevis</i>	25	2	90	0,18	Rettangolare	Continuo	Completa
[13]	<i>Zygosaccharomyces bailii</i>	26	2	30	0,06	Rettangolare	Continuo	Completa

Sulla base dei dati riportati, nella presente attività sono stati considerati $N = 100$ impulsi di durata $t_p = 2\mu$ s. Considerando un sistema per la generazione di impulsi rettangolari con frequenza di ripetizione $f = 2000$ Hz, il periodo del segnale applicabile corrisponde a $T_p = 1/2000$ s = 0.0005 s (vedi Figura 1.1). Il segnale così ottenuto ha un duty cycle $D = t_p/T_p = 0,4$ %. La durata totale del trattamento ottenuta, che dipende dalla frequenza del generatore di impulsi scelto, è di $t_{tot} = N \cdot T_p = 0,05$ s.

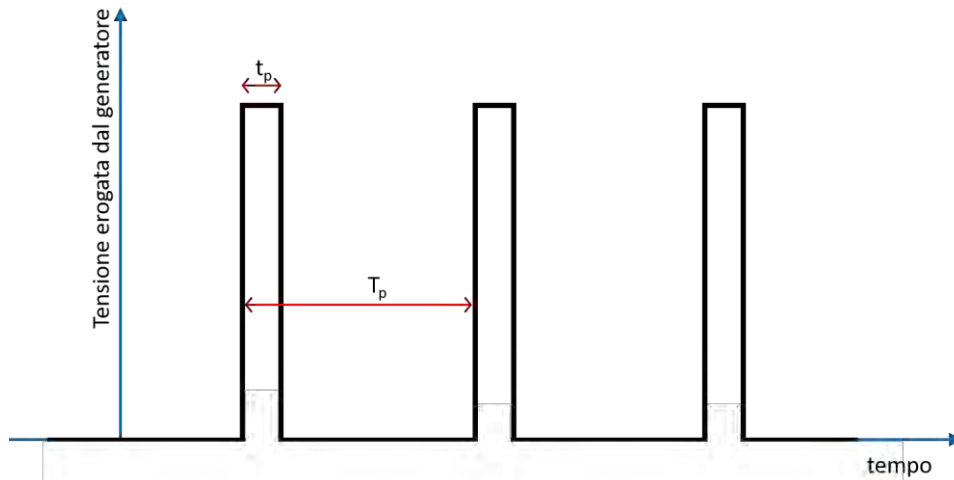


Figura 2.1. Caratteristiche del segnale di impulsi ad onda rettangolare erogato dal generatore di tensione.

2.3 Dimensionamento della camera di trattamento

Per la progettazione della camera di trattamento continuo destinata ad impianti di vinificazione di tipo industriale è stata scelta una camera di trattamento a facce parallele, che rappresenta la configurazione più efficace dal punto di vista dell'uniformità del campo elettrico, rispetto alla camere a configurazione cilindrica e co-lineare, in virtù della presenza di elettrodi a facce piane, caricati con polarità alternata, come mostrato in Figura 2.2.

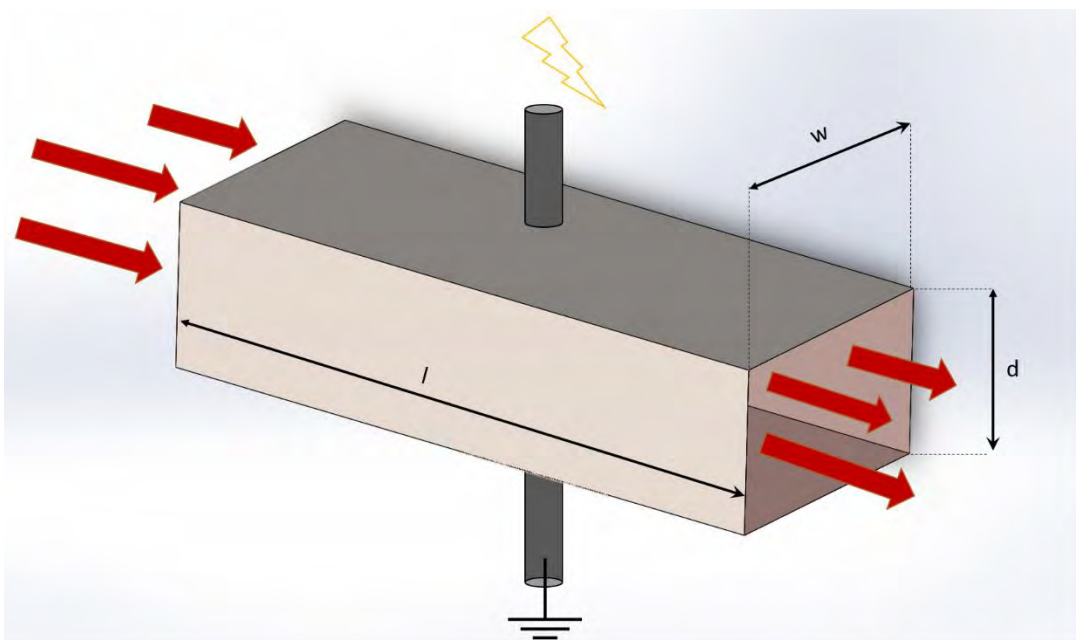


Figura 2.2. Geometria della camera di trattamento continuo a facce parallele.

Poiché il vino scorre all'interno di una camera a forma di parallelepipedo, il dimensionamento della camera è legato a tre parametri: la distanza, d , tra elettrodi, la larghezza, w , della camera e la sua lunghezza, l . Per garantire l'uniformità del campo elettrico, la distanza tra gli elettrodi, d , è stata mantenuta relativamente bassa. In particolare sono state considerate le dimensioni dei tubi filettabili per impianti idrotermo sanitari e altre applicazioni necessari per la connessione della camera di trattamento con la pompa peristaltica per la

generazione del flusso di vino. Secondo la norma UNI EN 10255, i tubi devono rispettare diametri stabiliti [14]. Tra i valori di diametro indicati dalla norma, è stato considerato un diametro interno di $\frac{1}{2}$ pollici, corrispondente a 1,27 cm. Tale valore è stato scelto per determinare la distanza tra i due elettrodi, d . Per ottenere un campo elettrico di 25-26 kV/cm (valori riportati da Beveridge e colleghi [13]) data una distanza $d = 1,27$ cm, sarà necessaria una tensione applicata di circa 30-40 kV, che è congruente con i valori di tensione forniti dai generatori ad impulsi comunemente utilizzati per trattamenti PEF. La larghezza della camera, w , è stata impostata pari a 2 cm per aumentare la portata di fluido trattato senza al contempo distanziarsi troppo dal valore del diametro del tubo. Variazioni sulla lunghezza, l , comporteranno una maggiore o minore portata, quindi una maggiore o minore potenza erogata da parte del generatore. Tale potenza deve essere verificata in relazione ai circuiti del generatore. Inoltre, la lunghezza della camera di trattamento, comporterà una maggiore o minore velocità del vino necessaria a garantire la durata del trattamento totale desiderata (vedi paragrafo 2.5 sullo studio dei parametri fluidodinamici). Nel presente lavoro sono stati considerati valori di lunghezza $l = 5$ cm e $l = 25$ cm.

2.4 Dimensionamento del raccordo camera di trattamento-tubi

La presenza di un brusco allargamento (angolo di raccordo a 90°) tra il condotto a sezione circolare e la camera di trattamento provoca una discontinuità nel profilo di velocità del fluido. Diverse prove sono state effettuate sulla geometria del raccordo camera di trattamento-tubi variando l'angolo di raccordo per evitare ristagni di fluido che causerebbero una disomogeneità nel trattamento del fluido stesso. Per evitare questo fenomeno, il raccordo è stato "ammorbidito" considerando un angolo di raccordo inferiore a 8° , come illustrato in Figura 2.3 (a). In Figura 2.3 (b) è illustrata la geometria 3D realizzata in SOLIDWORKS® considerando, oltre al raccordo anche due strutture tubulari per la connessione ai tubi.

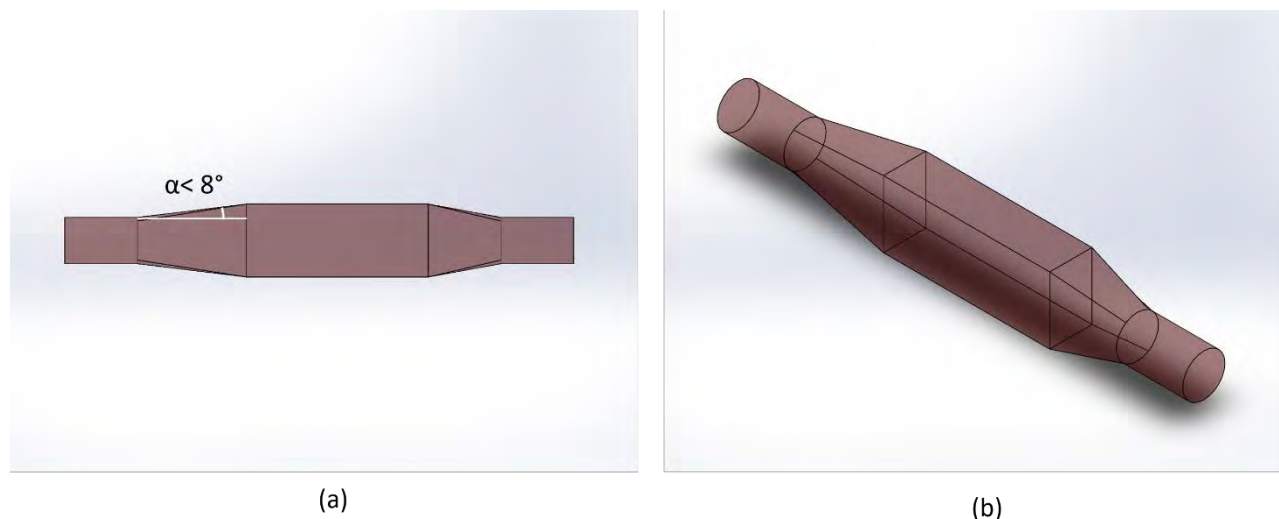


Figura 2.3. Geometria della camera di trattamento con raccordo ottimizzato per strutture tubulari secondo i requisiti della norma UNI EN 10255. (a) Vista laterale e valore dell'angolo di raccordo. (b) Vista 3D.

Secondo la norma UNI EN 10255, i tubi devono rispettare, oltre a diametri stabiliti, anche le seguenti caratteristiche [14]:

- Materiale: acciaio al carbonio
- Grado acciaio: S 195T
- Numero acciaio: 1.0026
- Carico unitario di rottura R [N/mm^2]: $320 \div 520$
- Carico unitario di snervamento ReH [N/mm^2]: 195

- Allungamento A min [%]: 20
- Composizione chimica (valori max in %): C 0.2; Mn 1.4; P 0.035; S 0.030

La geometria illustrata rappresenta il volume di fluido che fluisce all'interno di un volume di materiale isolante, polimetilmetacrilato (PMMA) o plexiglas, che non è stata rappresentata per semplicità. Gli elettrodi sono stati posizionati in due cavità all'interno del volume di plexiglass in modo da evitare spigoli sulla superficie a contatto con il fluido. Il risultato ottenuto in SOLIDWORKS® inserendo gli elettrodi è mostrato in Figura 2.4. In rosso è indicato il volume di vino che scorre all'interno della camera. Gli elettrodi ed i cavi di collegamento sono rappresentati in grigio. Il volume di plexiglas non è illustrato per semplicità.

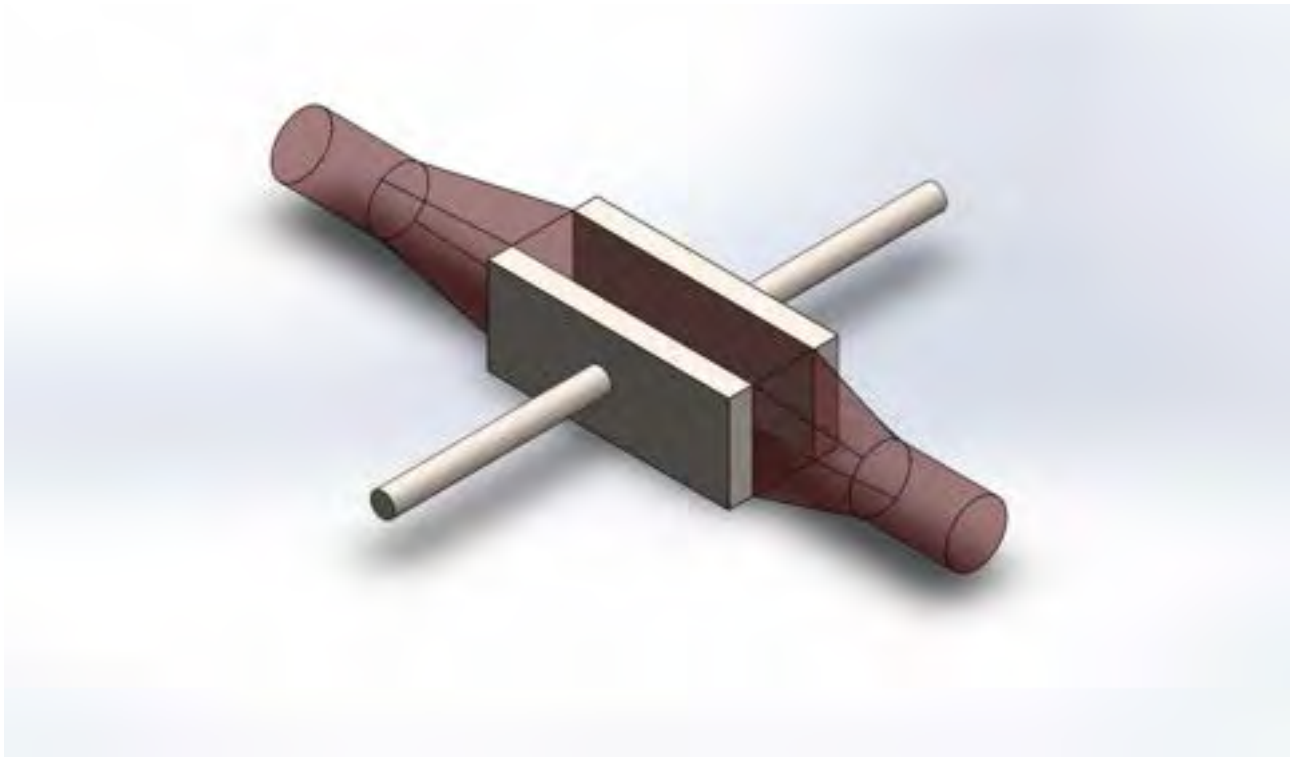


Figura 2.4. Geometria della camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele realizzata in SOLIDWORKS®.

2.5 Studio dei parametri fluidodinamici

Definiti parametri di processo e geometria della camera di trattamento, è possibile stimare la velocità massima ammissibile del vino all'interno della camera di trattamento. Questa sarà data dal rapporto tra la lunghezza della camera e la durata totale del trattamento, $v_{max} = l/(T_{tot})$, affinché sia garantita la durata del trattamento necessaria ad inattivare i microrganismi presenti nel vino. Utilizzando il principio di conservazione della massa che mette in relazione la massa di fluido che attraversa due sezioni, A_1 e A_2 , di dimensioni differenti

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2$$

è stata ricavata la velocità del fluido in ingresso necessaria per mantenere la velocità massima desiderata all'interno della camera di trattamento. Per i due valori di lunghezza scelti, $l = 5$ cm e $l = 25$ cm, otteniamo rispettivamente:

1. Lunghezza della camera di trattamento:
 $l = 5$ cm

Velocità massima del vino all'interno della camera di trattamento:

$$v_{camera} = l/T_{tot} = (5 \cdot 10^{-2} \text{ m}) / (0,05 \text{ s}) = 1 \text{ m/s}$$

Velocità massima del vino nel condotto di ingresso:

$$v_{inlet} = v_{camera} \cdot A_{camera} / A_{inlet} = 1 \text{ m/s} (1,27 \cdot 2) / (\pi \cdot 0,635^2) \approx 2 \text{ m/s}$$

Portata volumetrica:

$$Q = v_{camera} \cdot l \cdot w \cdot d = 1 \text{ m/s} (5 \cdot 1,27 \cdot 2) 10^{-6} \text{ m}^3 = 12,7 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 12,7 10^{-6} 3600 \text{ m}^3/\text{h} = 0,05 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = 0,012 \text{ l/s}$$

2. Lunghezza della camera di trattamento:

$$l = 25 \text{ cm}$$

Velocità massima del vino all'interno della camera di trattamento:

$$v_{camera} = l/T_{tot} = (25 \cdot 10^{-2} \text{ m}) / (0,05 \text{ s}) = 5 \text{ m/s}$$

Velocità massima del vino nel condotto di ingresso:

$$v_{inlet} = v_{camera} \cdot A_{camera} / A_{inlet} = 2 \text{ m/s} (1,27 \cdot 2) / (\pi \cdot 0,635^2) \cong 10 \text{ m/s}$$

Portata volumetrica:

$$Q = v_{camera} \cdot l \cdot w \cdot d = 1 \text{ m/s} (25 \cdot 1,27 \cdot 2) 10^{-6} \text{ m}^3 = 12,7 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 63,5 10^{-6} 3600 \text{ m}^3/\text{h} = 0,23 \text{ m}^3/\text{h}$$

Utilizzando le velocità ottenute è stato possibile stimare il regime di moto del vino all'interno della camera di trattamento utilizzando il numero di Reynolds

$$Re = \frac{v D}{\nu}$$

con D diametro equivalente per sezioni rettangolari uguale a

$$D = \frac{1,3 (w d)^{0,626}}{(w + d)^{0,25}} \cong \frac{4 w d}{2 (w + d)} = 1,55 \text{ cm}$$

e viscosità cinematica $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ approssimata alla viscosità cinematica dell'acqua. Il valore ottenuto, $Re = 15500 > 4000$ è indicativo di moto turbolento all'interno della camera, così come nelle tubature dove la velocità del fluido è maggiore. Il regime di moto turbolento assicura la completa agitazione delle particelle di fluido e l'uniformità della temperatura [13]. La condizione di moto turbolento ottenuta è stata utilizzata per lo sviluppo del modello computazionale in COMSOL, illustrato nel paragrafo successivo.

Sviluppo del modello computazionale

Lo sviluppo di un modello computazionale in COMSOL Multiphysics® è stato eseguito con la presente attività per un duplice scopo:

1. Verificare valore e uniformità del campo elettrico attraverso la risoluzione delle equazioni di campo nei domini tridimensionali delle geometrie realizzate.
2. Analizzare la distribuzione di velocità all'interno della camera di trattamento attraverso la risoluzione delle equazioni di Navier Stokes nei domini tridimensionali delle geometrie realizzate.

Il modello geometrico realizzato in SOLIDWORKS® è stato per questo importato in COMSOL Multiphysics® all'interno di un volume di materiale isolante, polimetilmetacrilato (PMMA), come illustrato in Figura 2.5. Per la soluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali con il metodo degli elementi finiti è stata realizzata una mesh di elementi tetraedrici. La dimensione dei tetraedri è stata scelta in relazione alla dimensione minima dei bordi degli elementi realizzati. Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 2.6.

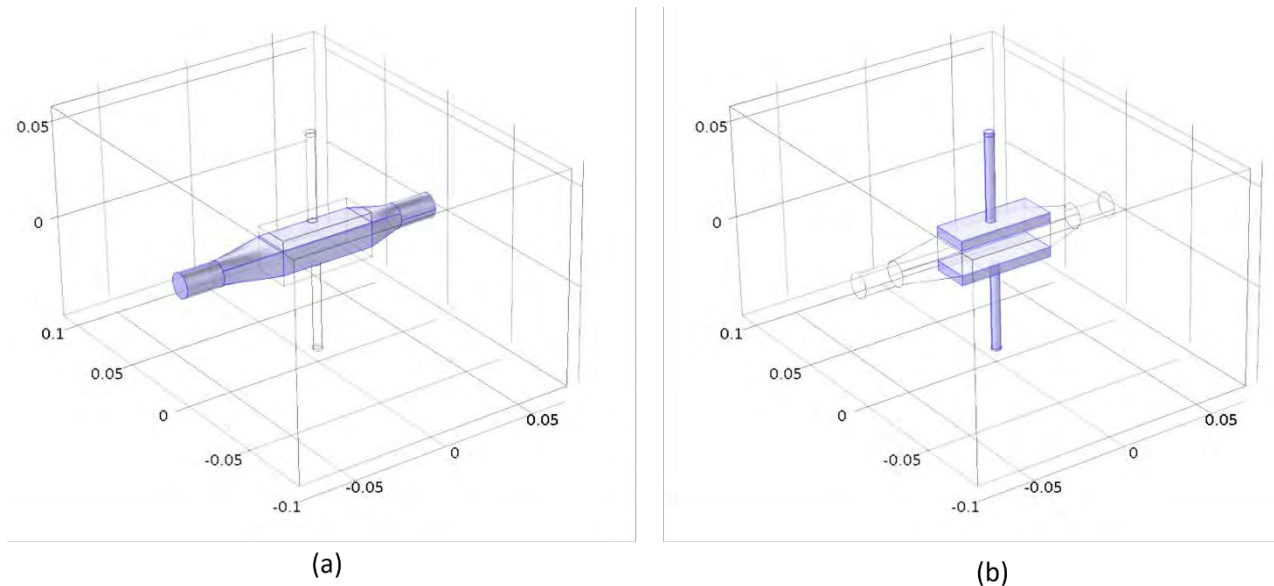


Figura 2.5. Importazione della geometria della camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele all'interno di un solido isolante in PMMA in COMSOL Multiphysics®.

Come per lo sviluppo del modello computazionale relativo alla bottiglia contenente vino (trattamento statico), il campo elettrico è stato simulato utilizzando il modulo AC/DC di COMSOL® (modulo elettrostatico e studio in regime stazionario) che risolve la legge di Gauss per il campo elettrico usando il potenziale elettrico scalare come variabile dipendente su un dominio tridimensionale (per maggiori dettagli vedi rapporto sull'annualità precedente).

In aggiunta al PMMA usato per il volume contenitivo, per il fluido all'interno della camera di trattamento è stata selezionata l'acqua come materiale in quanto approssima da un punto di vista dielettrico il comportamento del vino. Per gli elettrodi è stato impostato un materiale conduttivo come l'acciaio.

Per le condizioni al contorno, sono stati selezionati i due elettrodi impostando terra e tensione parametrica $V_0 = 40$ kV. In aggiunta, è stata impostata la carica nulla su tutti i contorni della geometria (condizione al contorno) e il valore nullo del potenziale su tutti i domini (condizione iniziale).

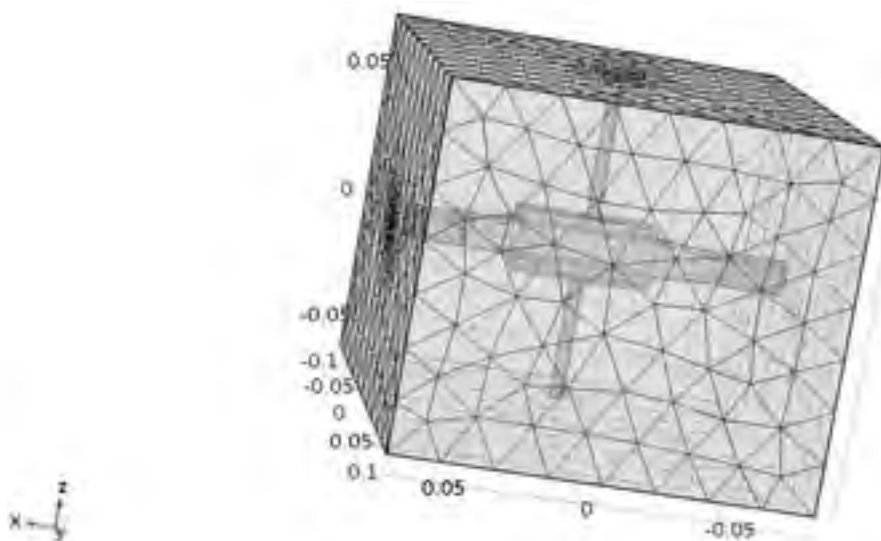


Figura 2.5. Mesh di elementi tetraedrici generata per la simulazione elettrostatica in COMSOL Multiphysics®.

Relativamente allo studio fluidodinamico, è stato utilizzato il modello k-omega ($k-\omega$) [15] che risolve due equazioni di trasporto, una per l'energia cinetica, k , ed una per la frequenza di turbolenza, ω . Tali equazioni si aggiungono al sistema di equazioni di Navier-Stokes e permettono l'analisi fluidodinamica in regimi di moto turbolento. È stata impostata la condizione di velocità nulla sulle pareti ad eccezione di quelle di ingresso e uscita del fluido (condizione al contorno) e velocità iniziali nulle sull'intero dominio analizzato (condizione iniziale). Sulla parete di ingresso la velocità è stata impostata pari a 2 m/s per $l = 5$ cm e uguale a 10 m/s per $l = 25$ cm, come ricavato nel paragrafo precedente. La parete di uscita è stata selezionata inserendo la condizione di assenza di reflusso, condizione che simula la presenza di una pompa peristaltica nel circuito idraulico. Le simulazioni fluidodinamiche richiedono una mesh più fitta, specialmente lungo le pareti, rispetto alla simulazione elettrostatica, ed i tempi di calcolo sono più elevati. La mesh realizzata per lo studio fluidodinamico è mostrata in Figura 2.6.

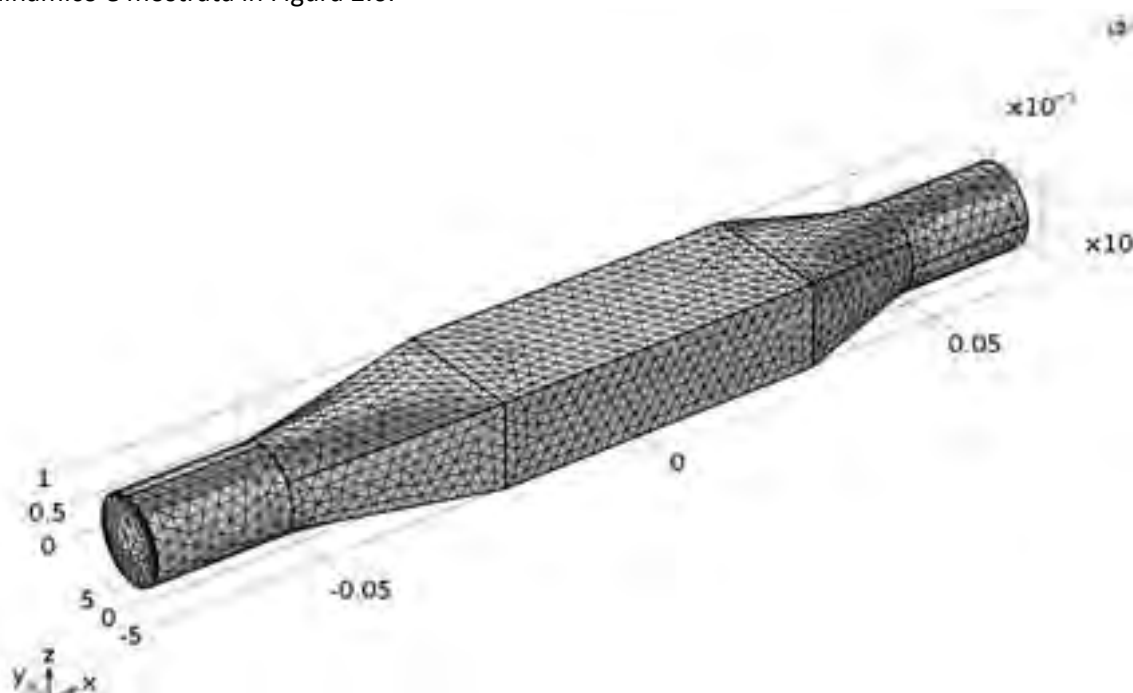


Figura 2.6. Mesh di elementi tetraedrici ottimizzata per la simulazione fluidodinamica in COMSOL Multiphysics®.

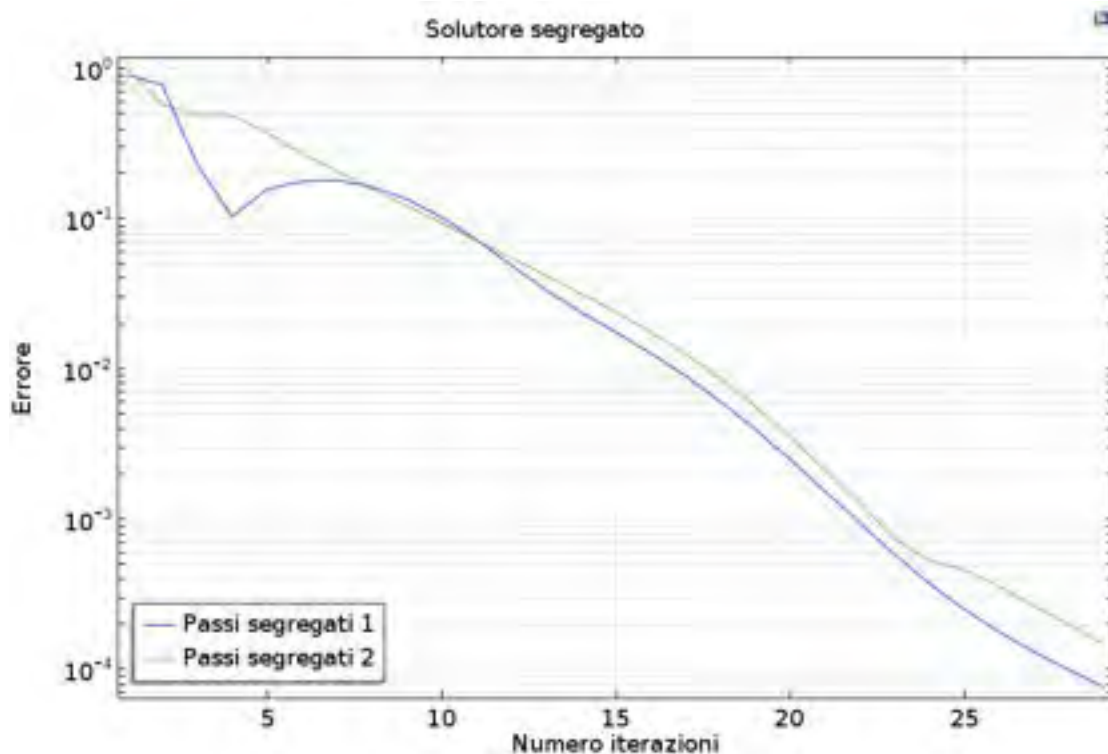


Figura 2.7. Grafico di convergenza della simulazione fluidodinamica in COMSOL Multiphysics®.

Mentre in Figura 2.7 è illustrato il grafico di convergenza del solutore, arrivato a convergenza dopo circa 30 iterazioni.

2.6 Analisi della distribuzione spaziale di campo elettrico all'interno della camera di trattamento

La tipologia di camera di trattamento realizzata risulta efficiente dal punto di vista dell'uniformità del campo. Data una tensione di 40 kV applicata sull'elettrodo positivo (in Figura 2.8 è mostrata la distribuzione spaziale del potenziale elettrico) il campo elettrico generato tra gli elettrodi risulta uniforme nel vino contenuto nella camera con valori di campo elettrico medi (e deviazione standard) di 34,7 (6,7) kV/cm.

In Figura 2.8 (b) è illustrata la distribuzione del modulo del campo elettrico ottenuta sul piano zx, i vettori del campo elettrico sono indicati in rosso.

In Figura 2.9 è illustrata la distribuzione del modulo di campo elettrico ottenuta sull'intero dominio 3D della camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele per una tensione applicata di 40 kV.

I risultati riportati si riferiscono alla configurazione della camera di trattamento per $l = 5$ cm. Risultati analoghi sono stati ottenuti per la configurazione con $l = 25$ cm con incremento di portata di fluido e di potenza erogata da generatore.

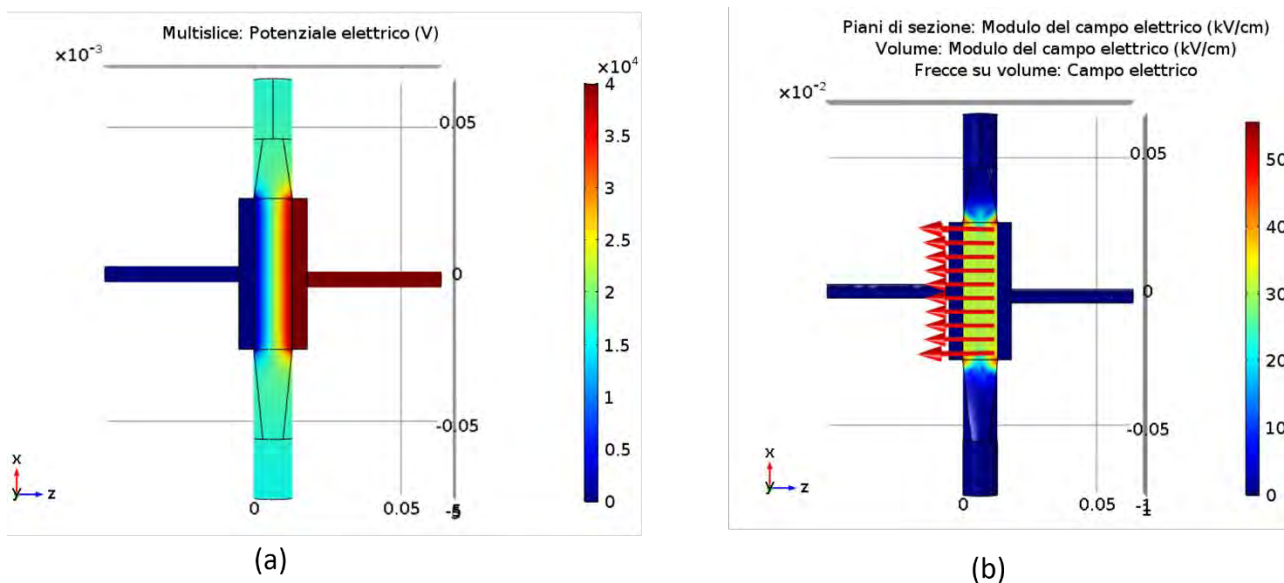


Figura 2.8. (a) Distribuzione spaziale del potenziale elettrico sul piano yz. (b) Distribuzione del modulo del campo elettrico e vettori del campo elettrico (in rosso) sul piano zx.

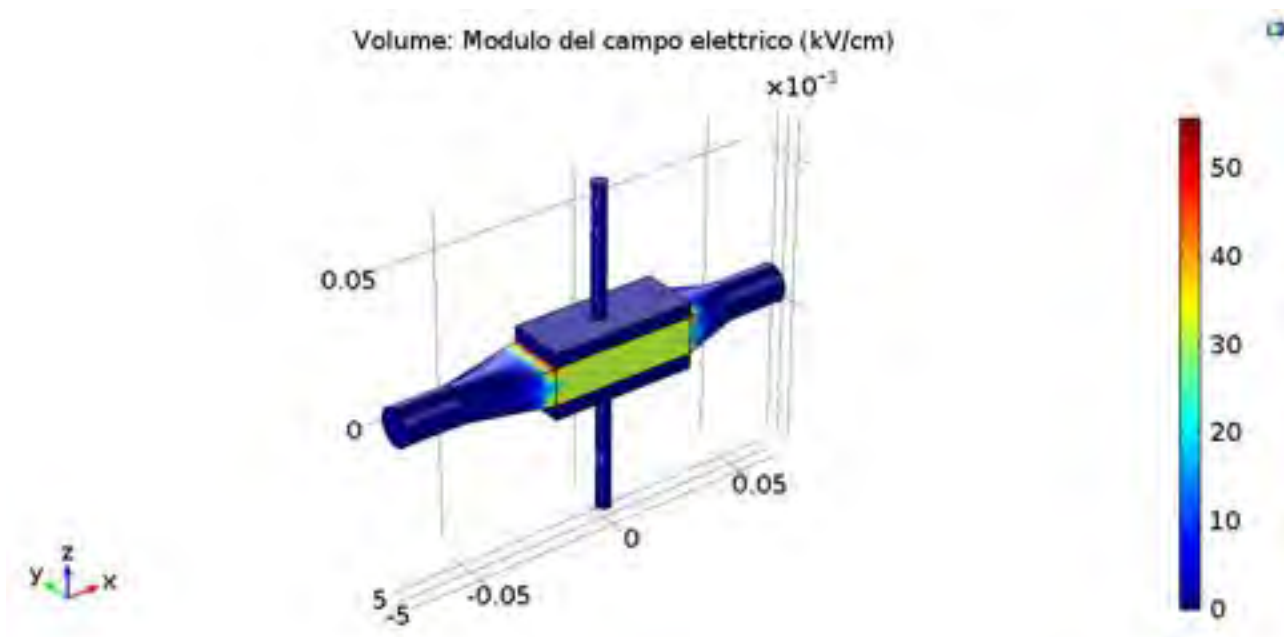


Figura 2.9. Distribuzione spaziale del modulo del campo elettrico ottenuta per la camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele.

2.7 Analisi fluidodinamica del flusso di vino all'interno della camera di trattamento

I risultati ottenuti con la simulazione fluidodinamica sono riportati in termini di velocità del vino all'interno della camera di trattamento e in termini di pressione esercitata dal vino sulla superficie della stessa. I valori del modulo della velocità del vino sono riportati nelle Figure 2.10 e 2.11 sui piani yz e xy per la configurazione di camera di trattamento della portata $Q = 0,012 \text{ l/s}$ e $Q = 0,064 \text{ l/s}$, rispettivamente.

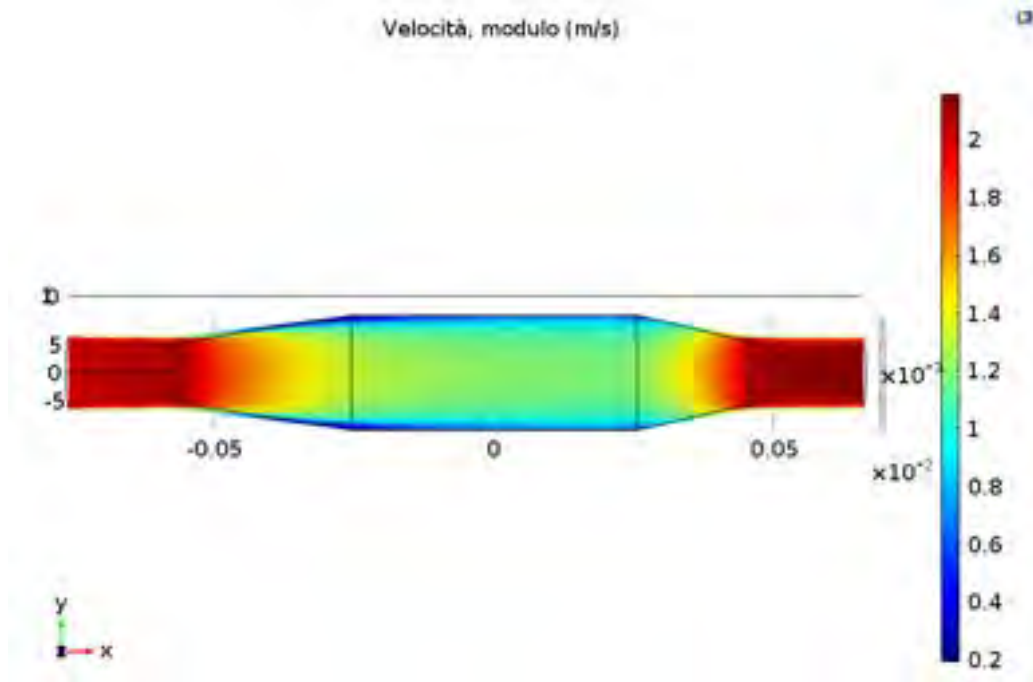
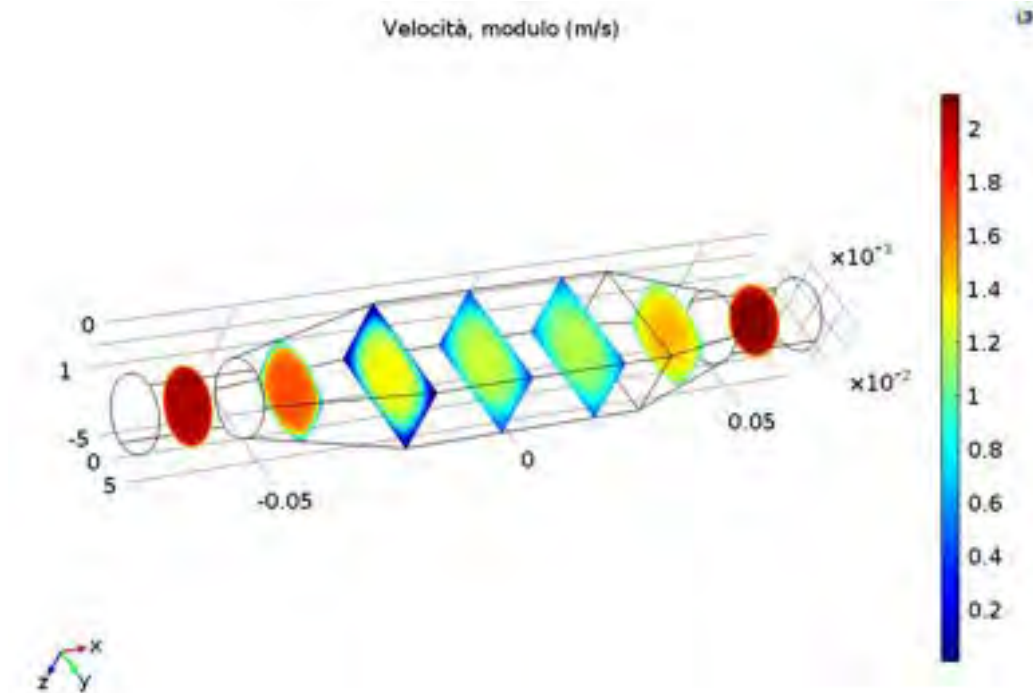


Figura 2.9. Distribuzione spaziale del modulo di velocità ottenuta per la camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele di portata $Q = 0,012$ l/s.

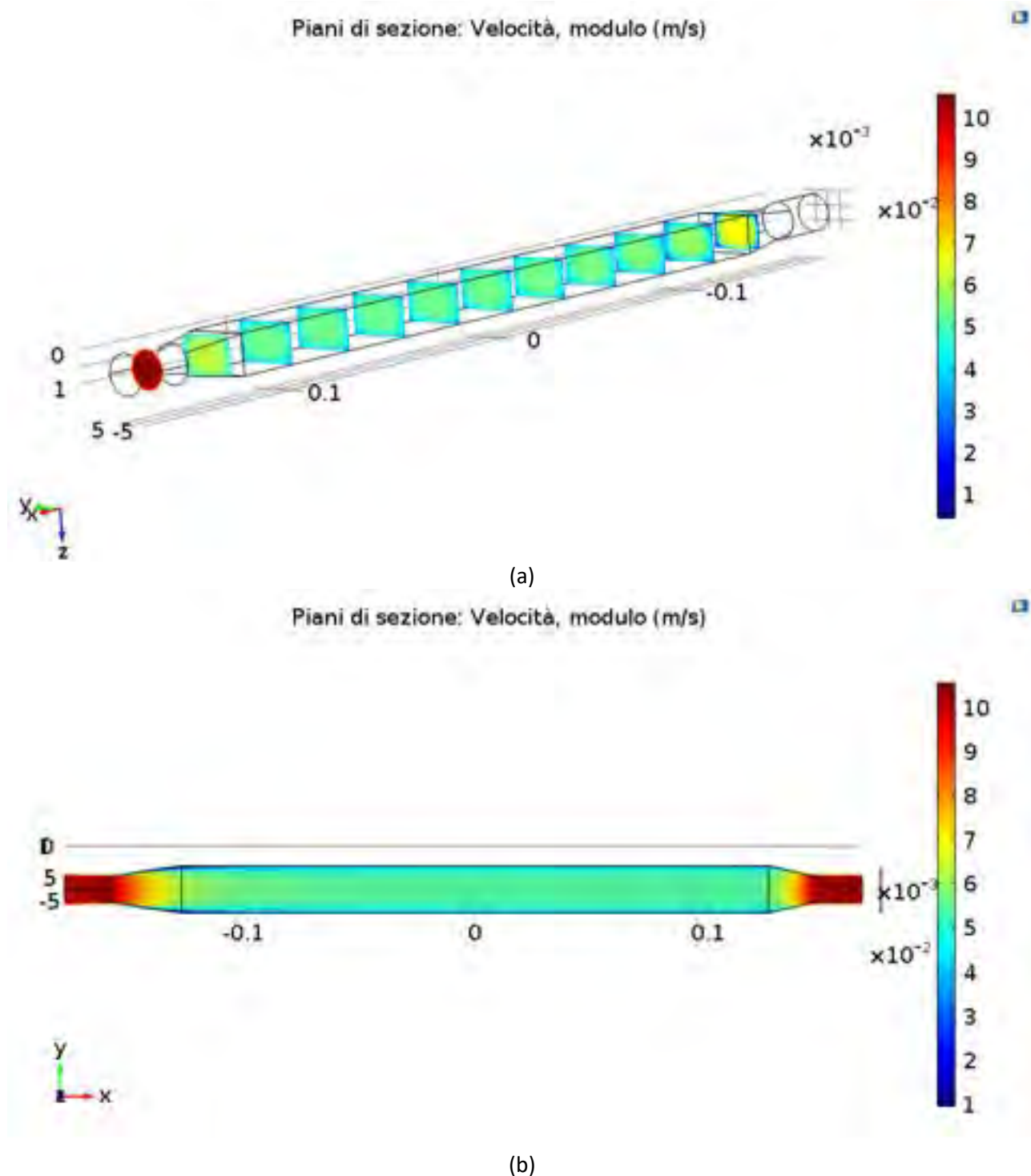


Figura 2.10. Distribuzione spaziale del modulo di velocità ottenuta per la camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele di portata $Q = 0,064$ l/s.

I valori ottenuti sono coerenti con la progettazione dei parametri fluidodinamici riportata nel paragrafo precedente, con valori medi del modulo di velocità all'interno della camera tra i due elettrodi di 2 m/s e 10 m/s, rispettivamente per la camera da 0,012 l/s e 0,064 l/s. In corrispondenza dei raccordi tubulari i valori di velocità sono dimezzati. In Figura sono mostrati i valori di pressione esercitati sulla superficie della camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele. In corrispondenza dei due elettrodi la pressione raggiunge valori massimi di 1800 Pa (0,02 atm) per una portata di 0,012 l/s e di circa 45000 Pa (0,44 atm).

Data l'equazione di Bernulli, i valori di pressione sono maggiori all'interno della camera tra i due elettrodi rispetto ai raccordi in virtù della minore velocità del fluido.

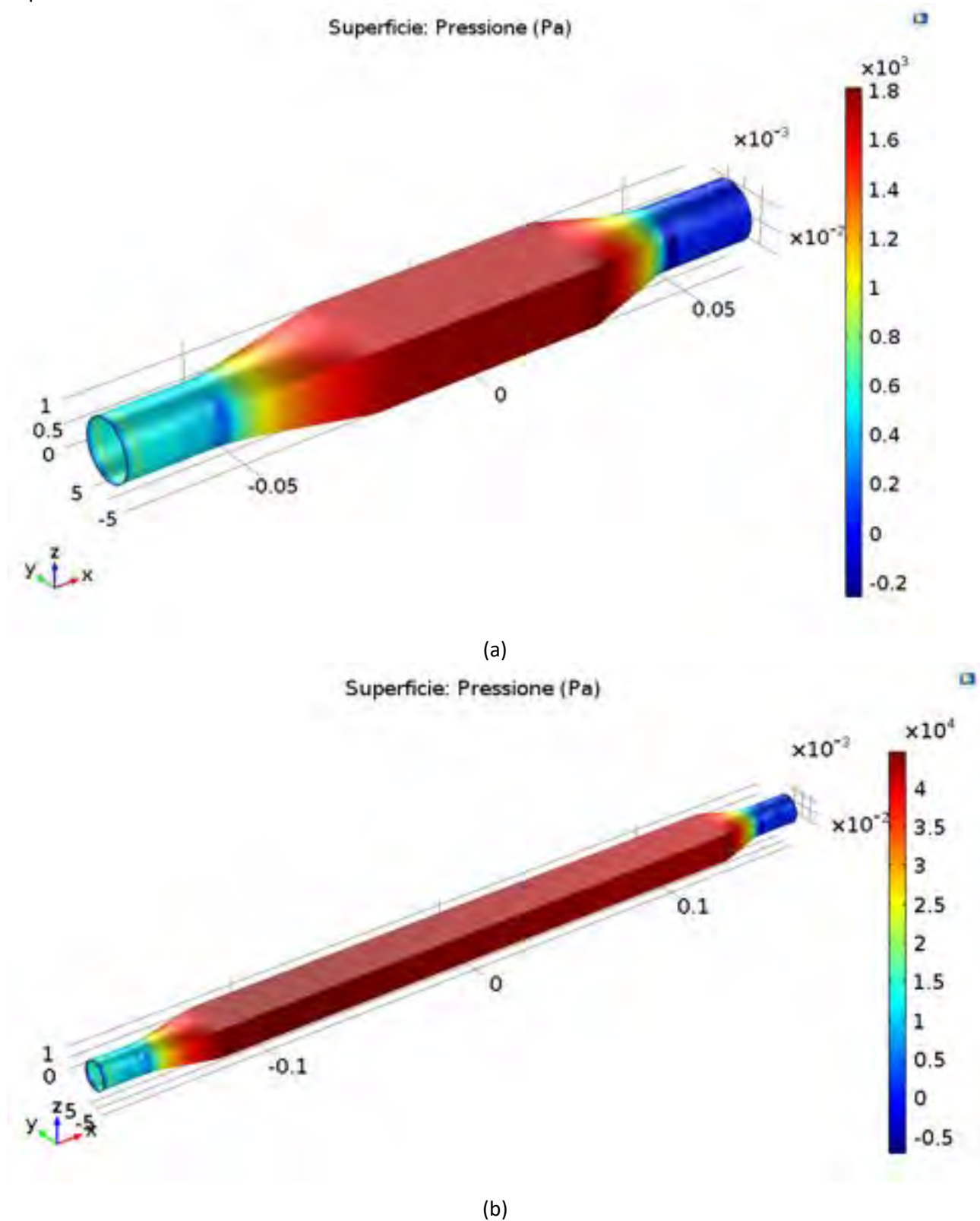


Figura 2.9. Pressione esercitata dal fluido sulla superficie esterna della camera di trattamento continuo con elettrodi a facce parallele di portata (a) 0,012 l/s e (b) 0,064 l/s.

2.8 Vincoli aggiuntivi di progettazione

Valgono le considerazioni riportate sul rapporto dell'attività relativo all'annualità precedente sui vincoli aggiuntivi di progettazione, per i quali può essere inserito un sistema di degassaggio per impedire la formazione di bolle d'aria che aumenterebbero localmente il modulo del campo elettrico e che potrebbero causare archi elettrici indesiderati. L'aggiunta di un sistema di raffreddamento, inoltre occorrerebbe per ridurre la temperatura degli elettrodi ed evitare il riscaldamento del vino.

3 Conclusioni

Mediante simulazioni elettrostatiche e fluidodinamiche sono stati progettati due sistemi PEF per il trattamento statico e continuo del vino. Il trattamento statico in bottiglia richiede, rispetto al trattamento continuo, un maggiore consumo energetico a causa della presenza dell'isolamento del vetro. I risultati ottenuti potranno essere utilizzati in fase di sperimentazione al fine di ridurre la quantità di solfiti utilizzata nel processo di vinificazione.

4 Bibliografia

- [1] M. C. Santos, C. Nunes, J. A. Saraiva e M. A. Coimbra, «Chemical and physical methodologies for the replacement/reduction of sulfur dioxide use during winemaking: review of their potentialities and limitations,» *European Food Research and Technology*, vol. 234, n. 1, pp. 1-12, 2012.
- [2] R. F. Guerrero e E. Cantos-Villar, «Demonstrating the efficiency of sulphur dioxide replacements in wine: A parameter review,» *Trends in Food Science & Technology*, 42(1),, vol. 42, n. 1, pp. 27-43, 2015.
- [3] E. Puértolas, N. López, Condón, S., J. Raso e I. Álvarez, «Pulsed electric fields inactivation of wine spoilage yeast and bacteria,» *International Journal of Food Microbiology*, vol. 130, n. 1, pp. 49-55, 2009.
- [4] E. Puértolas, N. Lopez, S. Condon, I. Alvarez e J. Raso, «Potential applications of PEF to improve red wine quality,» *Trends Food Sci Technol*, vol. 21, n. 5, pp. 247-255, 2010.
- [5] C. Delsart, N. Grimi, N. Boussetta, C. M. Sertier, R. Ghidossi, M. M. Peuchot e E. Vorobiev, «Comparison of the effect of pulsed electric field or high voltage electrical discharge for the control of sweet white must fermentation process,» *Journal of Applied Microbiology*, vol. 120, n. 1, pp. 152-164., 2016.
- [6] T. Garde-Cerdán, A. R. Marsellés-Fontanet, M. Arias-Gil, C. Ancín-Azpilicueta e O. Martín-Belloso, «Influence of SO₂ on the evolution of volatile compounds through alcoholic fermentation of must stabilized by pulsed electric fields,» *European Food Research and Technology*,, vol. 227, n. 2, pp. 401-408, 2008.
- [7] T. Garde-Cerdan, M. Arias-Gil, A. R. Marselles-Fontanet, A.-A. C. e O. Martin-Belloso, «Effects of thermal and non-thermal processing treatments on fatty acids and free amino acids of grape juice,» *Food Control*, vol. 18, n. 5, pp. 473-479, 2007.
- [8] F. Donsi, G. Ferrari, M. Fruilo e G. Pataro, «Pulsed electric field-assisted vinification of Aglianico and Piediroso grapes,» *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 58, n. 22, pp. 11606-11615, 2010.
- [9] E. Puértolas, G. Saldaña, S. Condón, I. Álvarez e J. Raso, «Evolution of polyphenolic compounds in red wine from Cabernet Sauvignon grapes processed by pulsed electric fields during aging in bottle,» *Food Chemistry*, vol. 119, n. 3, pp. 1063-1070, 2010.
- [10] N. López, E. Puértolas, P. Hernández-Orte, I. Álvarez e J. Raso, «Effect of a pulsed electric field treatment on the anthocyanins composition and other quality parameters of Cabernet Sauvignon freshly fermented model wines obtained after different maceration times,» *LWT-Food Science and Technology*, vol. 42, n. 7, pp. 1225-1231, 2009.
- [11] COMSOL Multiphysics®, *Version 4.1 COMSOL, Inc.*, Burlington, MA, USA., 2011.
- [12] COMSOL Multiphysics software, «The Finite Element Method (FEM),» [Online]. Available: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>. [Consultato il giorno 2 Ottobre 2017].
- [13] J. R. Beveridge, K. Wall, S. J. MacGregor, Anderson, J. G. e N. J. Rowan, «Pulsed electric field inactivation of spoilage microorganisms in alcoholic beverages and the influence of pulse profile,» in *IEEE International Pulsed Power Conference*, 2003.
- [14] Prosystemitalia, «prosystemitalia.com,» [Online]. Available: http://prosystemitalia.com/img/cms/Note_tecniche/06_caratteristiche_dei_tubi.pdf. [Consultato il giorno 1 Settembre 2018].
- [15] S. P. e A. S., «A one-equation turbulence model for aerodynamic flows,» American Institute of Aeronautics and Astronautics, Technical Report AIAA-92-0439, 1992.
- [16] U.S. Food and Drug Administration, «Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies,» Institute of Food Technologists, Silver Spring, 2000.
- [17] S. Jayaram e G. S. P. M. A. Castle, «Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltage pulses,» *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 40, n. 11, pp. 1412-1420, 1992.
- [18] H. P. J. Hülshager e E. G. Niemann, «Killing of bacteria with electric pulses of high field strength,» *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 20, n. 1, pp. 53-65, 1981.

- [19] M. Peleg, «A model of microbial survival after exposure to pulsed electric fields,» *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 67, n. 1, pp. 93-99, 1995.
- [20] H. Hülshager e E. G. Niemann, «Lethal effects of high-voltage pulses on E. coli K12,» *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 18, n. 4, pp. 281-288, 1980.
- [21] H. L. Lelieveld, S. Notermans e S. W. H. De Haan, *Food preservation by pulsed electric fields: from research to application*, Elsevier, 2007.
- [22] J. E. Dunn e J. S. Pearlman, «Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products». Brevetto U.S. Patent No. 4,695,472., 22 September 1987.
- [23] A. H. Scott e H. L. Curtis, «Edge correction in the determination of dielectric constant,» *Journal of Research*, vol. 22, pp. 747-775, 1939.
- [24] S. Ramo, J. R. Whinnery, T. Van_Duzer, P. Antognetti, B. Bianco e A. Chiabrera, *Campi e onde nell'elettronica per le comunicazioni*, Milano, Italy: Franco Angeli Editore, 1984.
- [25] C. Serpico, «Note sulla teoria dei campi e del potenziale,» 7 Gennaio 2002. [Online]. Available: http://wpage.unina.it/serpico/teaching/note_sui_campi.pdf. [Consultato il giorno 28 Settembre 2017].
- [26] G. Lupò, « Corso di Materiali e Tecnologie Elettriche,» 2009/10. [Online]. Available: http://www.elettrotecnica.unina.it/files/lupo/upload/MTE__04.pdf. [Consultato il giorno 29 Settembre 2017].
- [27] XS Instruments, «CONDUCTIVITY METERS,» [Online]. Available: <http://www.xsinstruments.com/01/conductimeters.htm>. [Consultato il giorno 2 Ottobre 2017].
- [28] The MathWorks, Inc., *MATLAB and Statistics Toolbox*, Natick, Massachusetts, United States, Release 2016a .
- [29] M. Salmeri e A. Mencattini, *Misure e analisi dati*, Roma: TEXMAT, 2016.
- [30] J. lu, G. S. Mittal e M. W. Griffiths, «Reduction in levels of Escherichia coli O157: H7 in apple cider by pulsed electric fields,» *Journal of Food Protection*, vol. 64, n. 7, pp. 964-969, 2001.
- [31] G. A. Evrendilek, S. Li, W. R. Dantzer e Q. H. Zhang, «Pulsed electric field processing of beer: Microbial, sensory, and quality analyses,» *Journal of Food Science*, vol. 69, n. 8, pp. M228-M232, 2004.

CURRICULUM VITAE

di *Marcello Salmeri*, nato a Roma il 27 giugno 1963.

Marcello Salmeri consegue la **Laurea in Ingegneria Elettronica** nel 1989 presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", e nel 1993 il **Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica, dell'Informazione e dell'Automazione**. Il 2 novembre 1994 prende servizio come **Ricercatore Universitario** presso il Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università di Roma "Tor Vergata". Il 1° ottobre 2005 prende servizio come **Professore Associato** presso l'Università di Roma "Tor Vergata". Attualmente è del SSD INF-ING/07 (Misure Elettriche ed Elettroniche).

*Gli argomenti di ricerca attualmente si articolano essenzialmente sulla **caratterizzazione metrologica di sistemi (di elaborazione e dispositivi)** e sullo **studio e implementazione di algoritmi e sistemi di elaborazione dati**.*

Queste tematiche sono state sviluppate in particolare negli ambiti delle apparecchiature e procedure diagnostiche nella medicina al fine di sviluppare metodi di supporto decisionali da parte del medico. Esse hanno coinvolto tra l'altro l'ideazione e la valutazione di metriche atte a valutare l'efficacia di sistemi di elaborazione in campo decisionale, in termini di specificità, sensibilità, accuratezza, precisione etc. e la modellizzazione, rappresentazione e propagazione dei contributi di incertezza di misura attraverso algoritmi e sistemi di acquisizione ed elaborazione di segnali e immagini e sistemi di previsione di serie di dati temporali. Le ricerche hanno approfondito anche argomenti di analisi e processamento dati non convenzionali come reti neurali e sistemi in logica fuzzy.

Si è occupato nel settore della microelettronica di tematiche inerenti la valutazione della potenza dissipata e l'ottimizzazione di architetture per l'efficienza energetica.

*Tra le attività professionali ha svolto collaborazioni di consulenza per la valutazione di congruenza e la stesura di capitolati tecnici per diverse aziende (**Olivetti, Lottomatica, Ferrovie dello Stato**).*

*È stato consulente di **Texas Instruments, Alenia, Consultant, Q-Service, Dipartimento di Amministrazione Penitenziaria del Ministero di Giustizia, Geyser | 3, ENEA, Pragma, Lince, Xenta Systems**.*

*È stato collaboratore di CTU (**Consulente Tecnico di Ufficio**) di processi civili e penali per i tribunali di Velletri, Albano e Frascati e **Consulente di parte per l'Avv. Carlo Taormina** per procedimenti penali.*

*Attualmente è docente del corso di **Misure ed Analisi Dati**, in cui svolge il programma della teoria delle misure e dell'analisi statistica dei dati nonché tematiche relative al supporto alle decisioni.*

Il 29 luglio 2016 è stato nominato dal Rettore Coordinatore del Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.