



**FACULTATEA DE INGINERIA MATERIALELOR ȘI A MEDIULUI**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**Contribuții la dezvoltarea sistemelor multifuncționale  
compacte de imagistică de raze X  
(REZUMAT)**

**Student-doctorand  
Ing. Cosmin Dobrea**

**Conducător științific  
Prof.dr.fiz. Traian Petrișor**

**Comisia de evaluare a tezei de doctorat:**

Președinte: - Prof.dr.ing. Cătălin Popa - UTCN  
Conducător științific: - Prof.dr.fiz. Traian Petrișor - UTCN  
Referenți: - Dr.fiz. Ion Tiseanu - INFLPR  
- Prof.dr.ing.fiz. Ionel Chicinaș – UTCN  
- Dr.ing. Petre Bădică - INCDFM

**- Cluj-Napoca -  
2021**

## Introducere

---

Ca urmare a unei activități personale de peste 10 ani în domeniul cercetării științifice am dorit să sistematizez experiența și informațiile dobândite sub forma unei teze de doctorat. Aceasta se intitulează „Contribuții la dezvoltarea sistemelor multifuncționale compacte de imagistică de raze X” și se încadrează în categoria cercetărilor aplicative.

Activitatea s-a desfășurat în Institutul Național pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației (INFLPR), în cadrul Centrului de imagistică de raze X. Cu îndrumarea domnului dr. Ion Tiseanu, am luat parte la diferite proiecte naționale și internaționale, alături de o echipă formată din profesioniști în domeniu. Câteva dintre rezultatele obținute vor fi prezentate mai pe larg în această lucrare.

În cadrul Centrului de imagistică de raze X s-a dorit extinderea, dezvoltarea și îmbunătățirea activităților de cercetare-dezvoltare. Analiza nedistructivă a obiectelor este un subiect de actualitate atât în domeniul cercetare – dezvoltare cât și în cel industrial. Astfel s-a conturat în mod natural necesitatea realizării unui instrument multifuncțional mobil, care să îmbine două tehnici de control nedistructiv, tomografia și fluorescența de raze X, pentru o caracterizare complexă, neinvazivă a materialelor, componentelor (ansamblurilor) și proceselor.

**Microtomografia de raze X** este o tehnică de inspecție nedistructivă care permite vizualizarea structurii interne a probelor până la detalii de câțiva microni. Metoda presupune achiziția unui număr mare de imagini ale probei din unghiuri diferite, cu scopul reconstrucției fidele a modelului 3D al acesteia. Pentru a numi numai câteva avantaje, prin acest procedeu probele pot fi caracterizate morfologic și compozițional prin vizualizarea variațiilor de densitate în volum, porilor, microdefectelor, cu posibilitatea efectuării de măsuratori geometrice 3D de mare precizie.

**Microfluorescența de raze X** este un procedeu nedistructiv de inspecție și analiză spectrală prin intermediul căruia se pot determina elementele chimice constitutive ale probelor atât din punct de vedere calitativ, cât și din punct de vedere cantitativ. Acest tip de analiză are aplicabilitate inclusiv în determinarea de grosimi de straturi subțiri prin convertirea intensităților liniilor caracteristice de fluorescență de raze X în concentrații absolute. În acest caz este vorba despre obiecte a căror calități sunt îmbunătățite prin depuneri metalice pe suprafața lor, atât pentru domeniul cercetare-dezvoltare cât și pentru domeniul industrial. Metoda permite maparea de mare rezoluție spațială a compoziției și grosimii acoperirilor acestor probe.

Sistemul multifuncțional ce îmbină cele două modalități de investigări nedistructive poate avea aplicabilitate în ramurile: cercetare – dezvoltare, industrie, educație, electronică, medicină veterinară, geologie, agronomie, farmacie etc.

În cadrul echipei de cercetare mi-a revenit sarcina proiectării, construirii, testării și validării acestui instrument. Această importantă activitate a fost atât oportună cât și de actualitate deoarece acest instrument a contribuit la realizarea obiectivelor multor proiecte, atât naționale cât și internaționale. Aceste rezultate au fost diseminate și valorificate prin intermediul lucrărilor științifice și conferințelor.

Deși până în momentul actual sistemul dezvoltat a fost folosit numai în cadrul activităților științifice de cercetare-dezvoltare, pe viitor aplicabilitatea acestuia ar putea fi extinsă și în industrie pentru activități de controlul calității (de ex. defectoscopie), fie în timp real în cadrul fluxului de producție, fie ulterior.

Importanța instrumentului este dată și de versatilitatea și mobilitatea acestuia, el putând fi adaptat, configurat și folosit cu ușurință în cadrul universităților sau facultăților tehnice în procesele pedagogice.

Acest sistem multifuncțional compact de imagistică de raze X are următoarele aplicații practice:

#### **Analiza nedistructivă**

- Vizualizare variații de densitate în volum;
- Caracterizare morfologică și compozițională a materialelor avansate;
- Studiul materiei vii - animale mici, semințe, etc;
- Caracterizarea porilor materialelor poroase;
- Platforma de dezvoltare nanomateriale pentru bio-imagistică;

#### **Defectoscopie**

- Vizualizarea microdefectelor (fisuri, incluziuni);
- Verificarea integrității structurale a componentelor dispozitivelor complexe;
- Analiza porozității pentru determinarea calității sudurilor și a lipiturilor;
- Analiza rebuturilor în producție – determinare cauze;

#### **Metrologie**

- Măsurători geometrice 3D de mare precizie;
- Caracterizarea producției prin analiza diferențelor dintre piesele proiectate și cele produse;
- Prototipare rapidă și inginerie inversă;

#### **Utilizare ca material didactic pentru**

- Organizarea de cursuri și *training*-uri în domeniul aplicațiilor de imagistica cu raze X;
- Pregătirea operatorilor din domeniu;
- Pregătirea studenților din cadrul facultăților tehnice și al facultăților de fizică.

#### **Stadiul tehnicii**

După știința mea, la momentul actual, un astfel de sistem precum cel dezvoltat în cadrul INFLPR reprezintă un element nou și unic la nivel național.

În această lucrare am caracterizat pe larg instrumentul și aplicabilitatea acestuia astfel:

Capitolul I – Baze teoretice – prezintă informații generale referitoare la radiația electromagnetică, radiația X și tomografia de raze X, ca baze necesare pentru dezvoltarea acestui instrument.

Capitolul II - Proiectarea și dezvoltarea *hardware* - prezintă specificațiile tehnice ale echipamentelor componente și aportul propriu referitor la obiectivele și activitățile specifice avute în vedere, pornind de la normele CNCAN aplicabile și continuând cu proiectarea mecanică și electrică, dezvoltarea și testarea instrumentului. Sunt de asemenea prezentate în detaliu modulele *hardware* componente de tomografie și fluorescență și modulul de tomografie *gantry*.

Capitolul III - Dezvoltarea *software* – prezintă aportul propriu constând în programele și modulele *software* dezvoltate pentru controlul echipamentelor *hardware* (surse de raze X, detectori și axe motorizate) și pentru achiziția și prelucrarea datelor obținute în urma experimentelor de tomografie și fluorescență de raze X.

Capitolul IV – Testare și validare prin aplicații specifice – prezintă o serie de rezultate obținute cu ajutorul acestui instrument, folosind razele X, în domeniile tomografie, fluorescență, difracție și dozimetrie.

## Capitolul 1 - Baza teoretică

### Radiația electromagnetică

Radiația electromagnetică este un fenomen fizic ce constă în propagarea oscilantă sincronizată a unui câmp electric și a unui câmp magnetic, perpendiculare unul față de celălalt și față de direcția de propagare. Ea este produsă ori de câte ori o particulă încărcată, cum ar fi un electron, își schimbă viteza - adică ori de câte ori este accelerată sau decelerată. Radiația electromagnetică are proprietăți atât de undă cât și de particulă și se propagă în vid cu viteza luminii. Mărimile ei caracteristice sunt prezentate în figura 1.1.

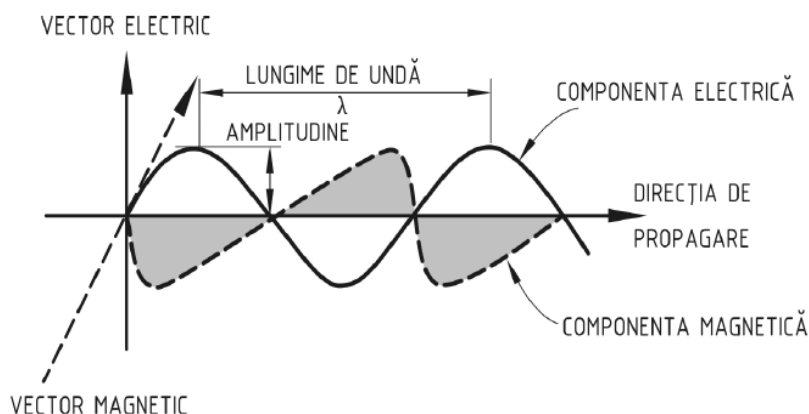


Figura 1.1. Componenta electrică și magnetică a unei unde electromagnetice

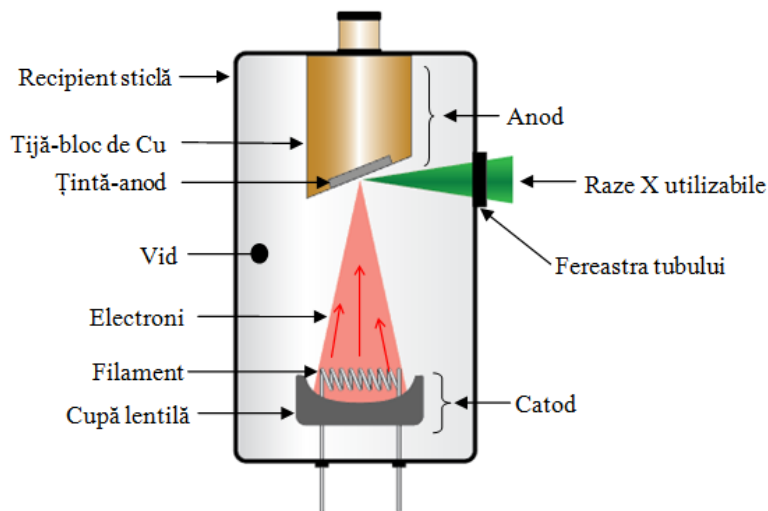
În funcție de lungimea de undă ( $\lambda$ ), radiația electromagnetică se împarte în următoarele categorii: **unde radio** ( $1 \text{ mm} < \lambda < 100 \text{ km}$ ), **microunde** ( $1 \text{ mm} < \lambda < 1 \text{ m}$ ), **radiație infraroșie** ( $700 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$ ), **radiație vizibilă** ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ), **radiație ultraviolet** ( $10 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$ ), **radiație X** ( $0.01 \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ nm}$ ), **radiație gamma** ( $\lambda < 0.01 \text{ nm}$ ).

### Radiația X

Descoperirea radiației X a fost făcută de Wilhelm Conrad Röntgen în 1895 în timpul experimentelor cu radiații catodice

Pentru folosirea radiației X la diverse aplicații, au fost dezvoltate generatoare de raze X, constând fiecare dintr-o sursă de înaltă tensiune și un tub de raze X. Cele mai întâlnite tuburi de raze X sunt cele de tip închis (Fig. 1.2).

Din punct de vedere tehnic, principalele componente ale unui tub de raze X sunt catodul și anodul. Funcționarea tubului se bazează pe excitarea atomilor din anod ca urmare a bombardării cu un fascicul de electroni de energie înaltă (10 KeV - 100 KeV) produs de către filamentul tubului care, de fapt, reprezintă catodul. Relaxarea atomilor în starea fundamentală are loc prin emisia unei radiații electromagnetice a cărei lungime de undă se găsește în domeniul radiației X.

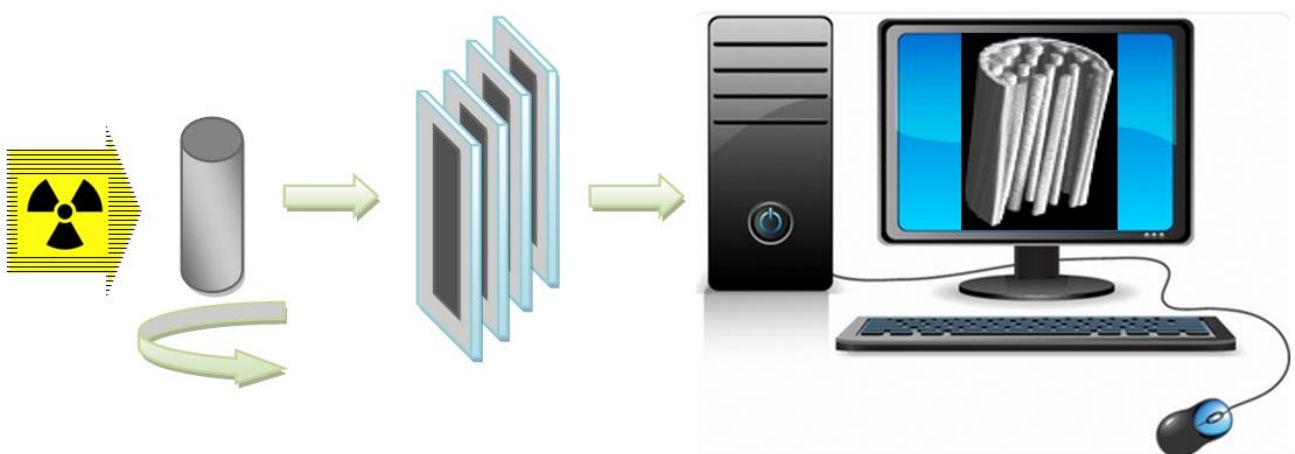


**Figura 1.2.** Schema unui tub de raze X

Electronii emiși de filament sunt accelerați spre anod într-un câmp electric creat de potențialul pozitiv al anodului în raport cu catodul. Electronii lovesc anodului, interacționează cu atomii lui și își pierd energia printr-o serie de procese fizice. Razele X iau naștere ca o consecință a acestor fenomene și sunt formate din două tipuri de radiații – radiații de frânare și radiații caracteristice.

## Tomografia de raze X

Figura 1.3 ilustrează principiul tomografiei de raze X. Obiectul care urmează a fi scanat este plasat în traiectoria unui fascicul de raze X. O parte din razele X sunt absorbite de către obiect, în timp ce razele X transmise ajung pe suprafața detectorului unde sunt transformate în lumină vizibilă prin intermediul unui scintilator și înregistrate. O scanare tomografică computerizată standard acoperă un interval unghiular de 360°. Imaginile înregistrate sunt procesate de un *software* dedicat, care utilizează algoritmi de reconstrucție matematică, pentru a reconstrui o imagine 3D a eșantionului. Programe *software* de vizualizare dedicate permit o vizualizare tridimensională sau de secțiuni transversale prin obiect.



**Figura 1.3.** Principiul tomografiei

## Capitolul 2 - Proiectarea și dezvoltarea *hardware*

### Considerații generale și obiective

Acest capitol prezintă contribuția autorului și aspectele cheie cu privire la realizarea echipamentului de raze X multifuncțional, constând în: proiectarea, dezvoltarea, testarea și validarea echipamentului.

Dezideratele principale urmărite în proiectarea și realizarea acestui echipament complex de microtomografie și microfluorescență de raze X au fost următoarele:

- 1) construcție robustă, simplă, ergonomică, estetică și repetabilă;
- 2) mobilitate (pentru a facilita deplasarea);
- 3) dimensiuni reduse (pentru a facilita amplasarea acestuia);
- 4) utilizare ușoară, facilă și comodă pentru operator;
- 5) modularitate (pentru reconfigurarea facilă a echipamentelor componente în diverse configurații experimentale);

Pentru atingerea acestor obiective s-a stabilit schema de principiu, așa cum este prezentată în figura 2.1, pentru echipamentul care conține următoarele componente:

- Doua tuburi (surse) de raze X de 50 kV și curent maxim 1 mA;
- Doua generatoare de înaltă tensiune pentru sursele de raze X;
- Doua surse de tensiune de 24 V pentru alimentarea generatoarelor de înaltă tensiune;
- Detector matricial de raze X pentru tomografie;
- Spectrometru format din detector de fluorescență și amplificator de semnal;
- Manipulator motorizat micrometric pentru probe, alcătuit din patru axe (X, Y, Z,  $\theta$ ) și unitate de control;
- Computer și UPS (sursă de curent neîntreruptibilă).

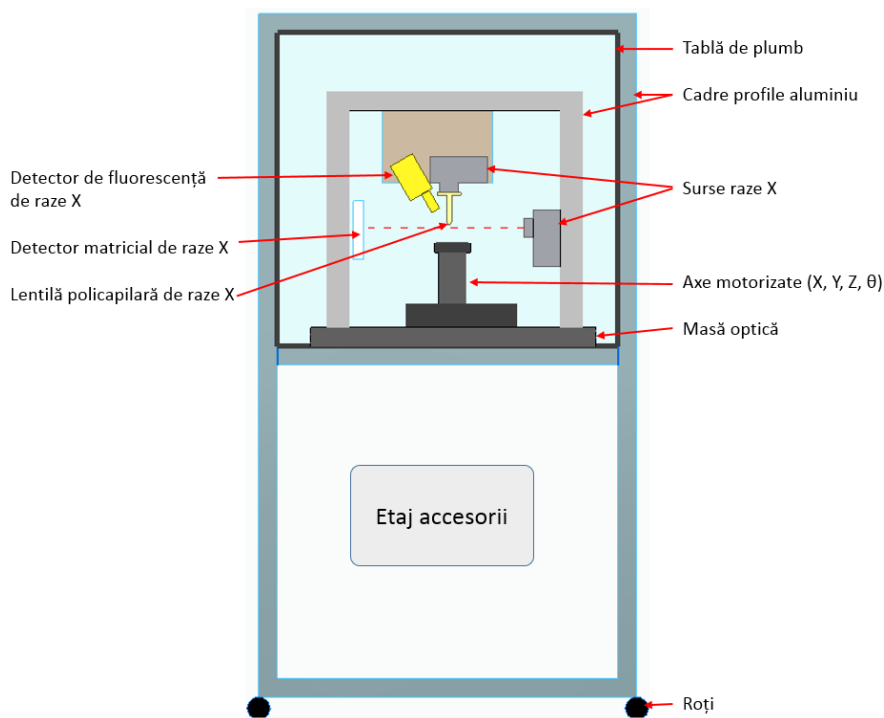


Figura 2.1. Schema de principiu a instrumentului

În proiectarea echipamentului s-a ținut cont de normele de securitate radiologică aplicabile ce sunt conținute în NSR 10 emise de Comisia Națională pentru Controlul Activităților Nucleare (CNCAN). Incinta de iradiere a fost căptușită cu tabla de Pb pt a împiedica emisia de raze X în exterior. Instalația a fost prevăzută cu următoarele dispozitive de protecție: Sistem de avertizare luminoasă, întrerupător de siguranță de tip *interlock*, buton de oprire de urgență.

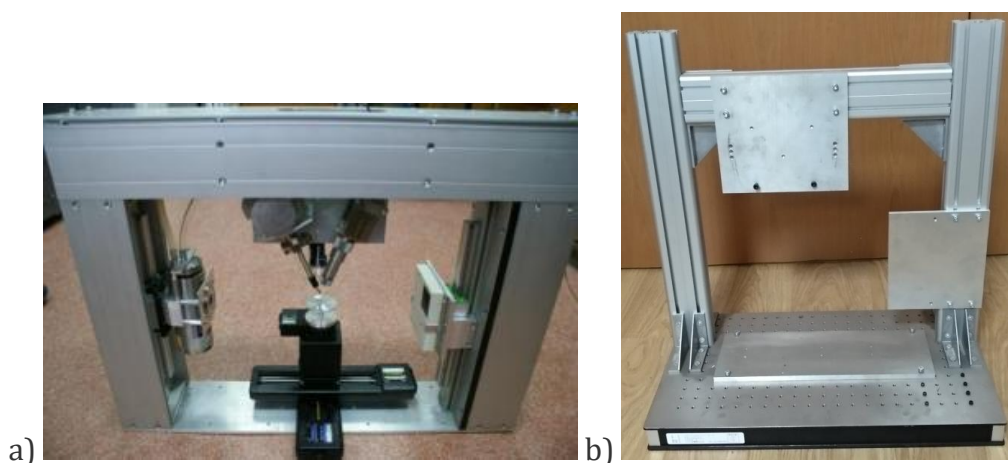
## Modulul de tomografie și fluorescență

Permite realizarea de experimente de tomografie (plan orizontal) și fluorescență (plan vertical) de raze X simultan. Am proiectat piese de susținere și răcire pentru sursele de raze X. Pe tubul de raze X folosit pentru experimente de fluorescență s-a montat o lentilă policapilară ce preia razele X emise sub formă de con și le focalizează pentru amplificarea intensității acestora pe o suprafață de câțiva zeci de microni (Fig. 2.2).



**Figura 2.2.** Piesa de răcire cu apă și susținere pentru sursa de raze X

Am dezvoltat un cadru de susținere al componentelor (Fig. 2.3. a) al cărui model a fost ulterior îmbunătățit (Fig. 2.3.b) pentru o mai bună îndeplinire a Obiectivului 5) "modularitate – reconfigurarea cu ușurință a echipamentelor conținute". Al doilea cadru este realizat din profile de aluminiu montate pe o masă optică. Această configurație este mai stabilă, mai rigidă și permite realizarea de montaje experimentale variate.



**Figura 2.3.** Modulul de tomografie și fluorescență. a) primul cadru; b) al doilea cadru de susținere

## Modulul de tomografie *gantry*

Tomografia *gantry* are ca principiu rotirea sursei de raze X și a detectorului în jurul probei de investigat, spre deosebire de tomografia clasică, unde sursa de raze X și detectorul au poziții fixe, iar proba este rotită în jurul propriei axe. Această tehnică este utilă pentru probe de dimensiuni medii, ce necesită o poziționare fixă, stabilă, pe parcursul achiziției de date, precum animale de dimensiuni mici sau probe ce nu au o structură unitară, solidă. Se poate folosi de asemenea pentru tomografii de proces, aplicații în care proba este supusă la diferite procese de durată, timp în care este tomografiată repetat.

Cadrul a fost executat din profile de aluminiu și este acționat de o axa de rotație motorizată. S-a folosit o sursă de raze X de 50 kV cu răcire cu ulei aliniată cu suportul de probe și cu detectorul matricial de raze X. Modulul realizat pentru tomografia *gantry* este prezentat în figura 2.4.

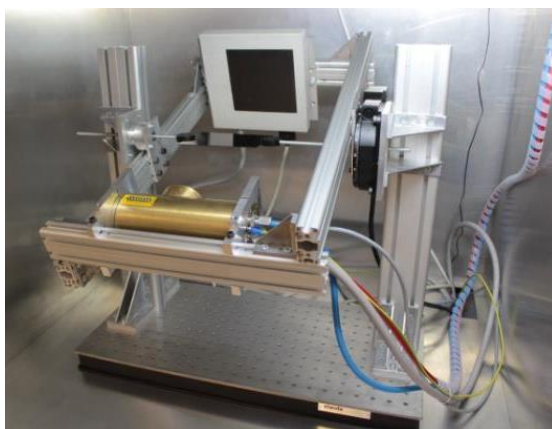


Figura 2.4. Modulul de tomografie *gantry*

Am modelat 3D cabinetul folosind programul Solid Works. Figura 2.5 prezintă randarea 3D și respectiv imaginea de ansamblu a echipamentului dezvoltat.



Figura 2.5. a) Randare 3D a proiectului cabinetului b) Imagine de ansamblu a echipamentului de raze X multifuncțional mobil



## Capitolul 3- Dezvoltarea software

### Considerații generale și obiective

Acest capitol prezintă în detaliu contribuția autorului ce vizează programele dezvoltate pentru controlul echipamentelor *hardware* și pentru achiziția și prelucrarea datelor obținute în urma experimentelor de tomografie și fluorescență de raze X. Pentru dezvoltarea programelor am folosit LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), o platformă și un mediu de dezvoltare software pentru limbajul de programare grafică dezvoltat de National Instruments.

Obiectivele referitoare la dezvoltarea *software* urmărite au fost: funcționalitate, fiabilitate, respectarea bunelor-practici în programare, testare și eliminare *bug*-uri, documentarea modului de funcționare a programelor.

Un program LabView are două componente – panoul frontal (*front pannel*) și diagrama bloc (*block diagram*) (Fig. 3.1). Funcțiile LabView sunt conținute în diagrama bloc.

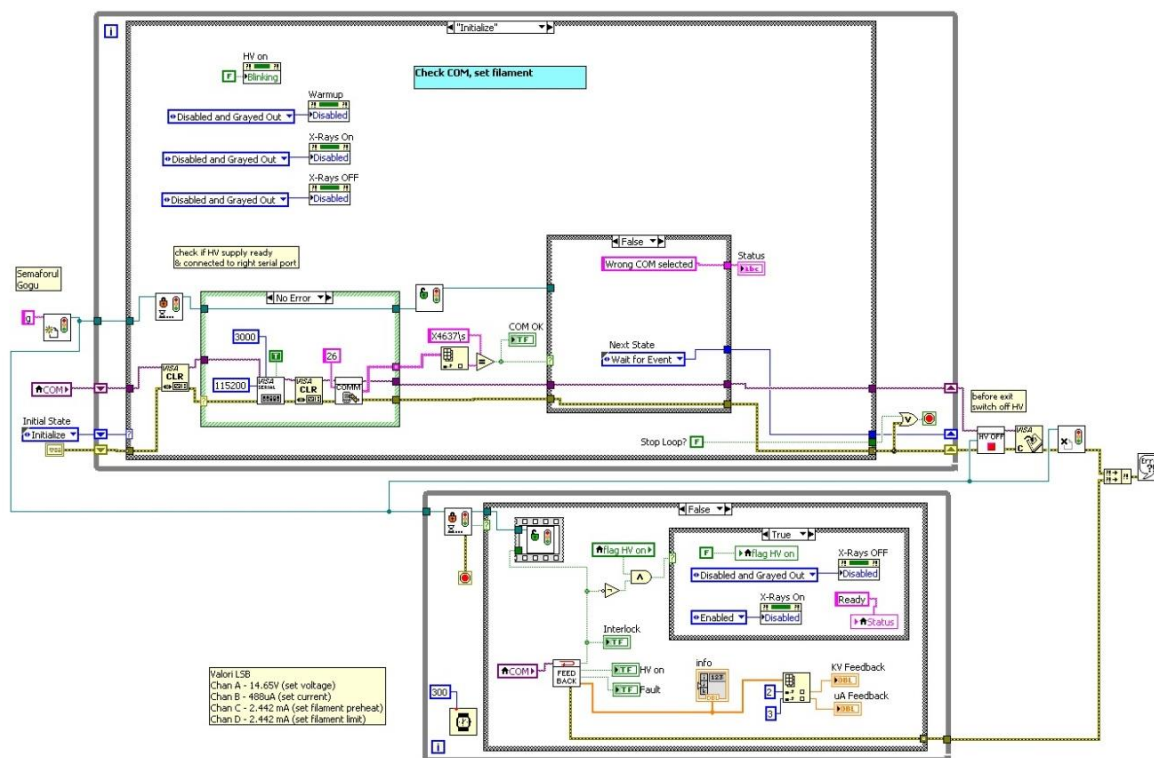
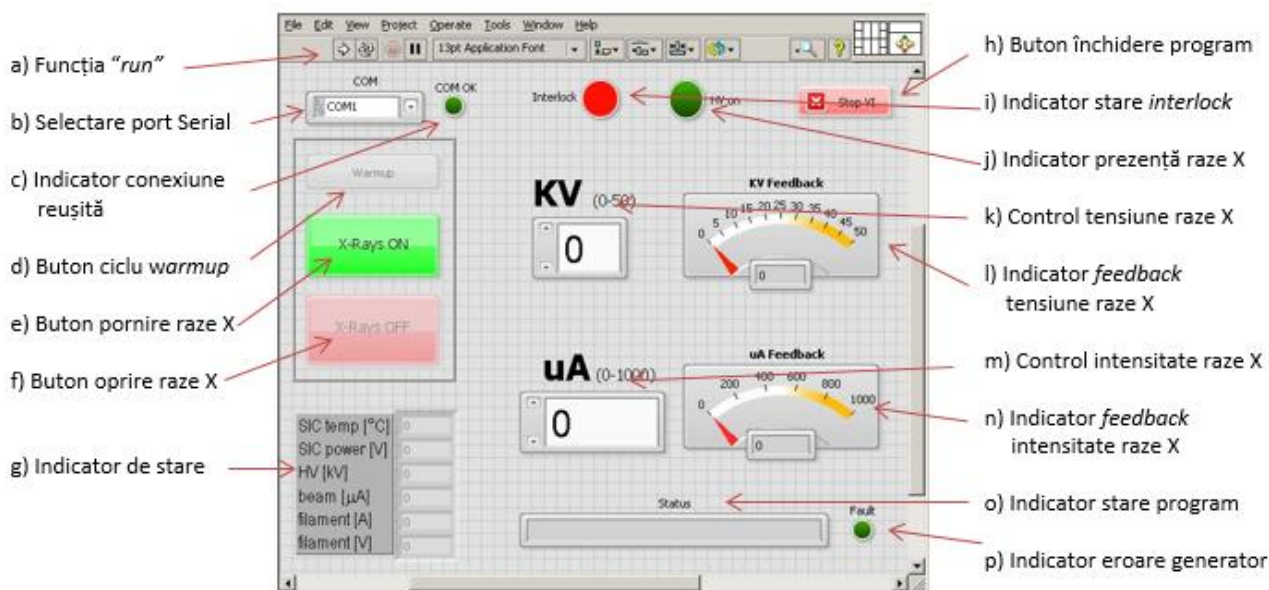


Figura 3.1. Diagrama bloc a programului de control al generatorului de raze X

Panoul frontal poate conține două tipuri de elemente – elemente de control și indicatori. Aceste elemente se regăsesc de asemenea și în diagrama bloc, la care se adaugă și constante. Elementele de control reprezintă intrări pentru funcții. Indicatorii reprezintă ieșiri ale funcțiilor. Toate aceste elemente sunt interconectate în diagrama bloc prin fire virtuale care reprezintă mediul de transmitere a datelor. Programele sunt salvate cu extensia „.vi” (*virtual instrument*). Aceeași extensie o au și subrutinele, module funcționale denumite *subvi*. Acestea conțin bucăți de cod ce poate fi reutilizat în cadrul programului principal sau al altor programe. Subrutinele se utilizează pentru o mai bună structurare, organizare și vizualizare a programului. Folosind *subvi*-uri se evită aglomerarea excesivă a diagramei bloc.

Pentru exemplificare, în figura 3.2 este prezentată interfața grafică a programului de control al generatorului de raze X folosit pentru modulul de tomografie *gantry*.

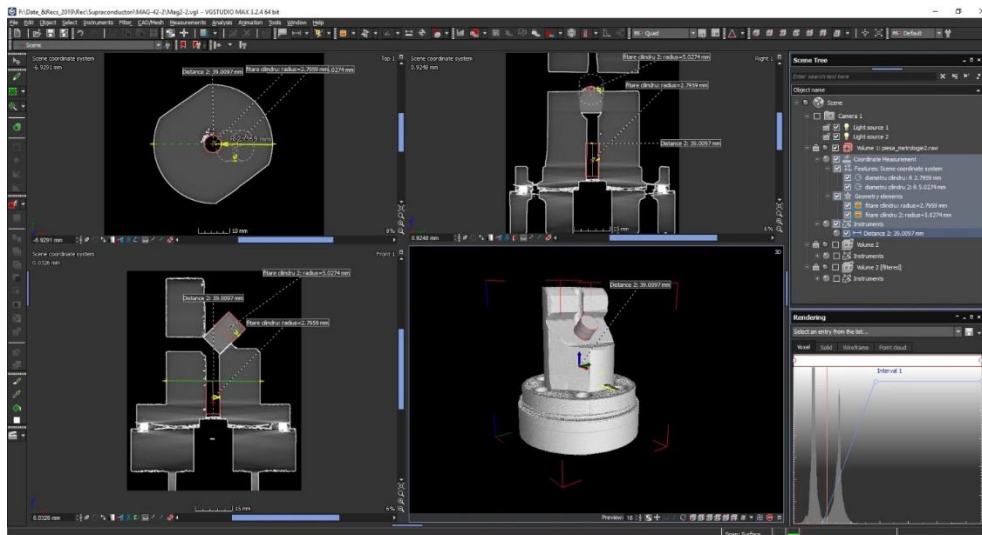


**Figura 3.2.** Interfața grafică a programului de control al generatorului de raze X

Am dezvoltat programe diferite pentru controlul detectorului matricial, al detectorului de fluorescență, al sursei de raze X și al axelor motorizate. De asemenea am dezvoltat programe pentru achiziția datelor prin tomografie clasică, prin tomografie *gantry* și pentru maparea probelor prin fluorescență de raze X.

Procesarea datelor de tomografie obținute, reconstrucția, vizualizarea și analiza imaginilor se fac prin intermediul VG Studio MAX, un *software* specializat pus la dispoziție de firma Volume Graphics, Germania.

În figura 3.3 este prezentată interfața programului VG Studio MAX în care se poate vedea reconstrucția 3D a unui obiect scanat. Interfața este constituită din patru panouri principale în care cel din dreapta-jos afișează reconstrucția 3D a obiectului investigat iar celelalte prezintă vederile de sus, față și lateral. Aceste vederi reprezintă secțiuni carteziene la coordonatele specificate de utilizator pe axele X, Y și respectiv Z.



**Figura 3.3.** Programul VG Studio MAX – interfața și reconstrucția tomografică a unei probe

## Capitolul 4 – Testare și validare prin aplicații specifice

### Analiză nedistructivă a depunerilor metalice prin fluorescență

Pentru caracterizarea uniformității straturilor acoperite cu W a probelor din reactoarele de fuziune a fost elaborată o metodă nedistructivă bazată pe tehnica de fluorescență de raze X (XRF). Această metodă permite atât evaluarea uniformității straturilor acoperite cu W, cât și o cartografiere cantitativă de compoziție și grosimi a probelor de tip multistrat.

Întâi a fost investigată o probă de calibrare cu strat de Cu de 10  $\mu\text{m}$  depus pe substrat de Fe după cum se vede în figura 4.1. Urmele de eroziune au fost produse de un dispozitiv GDOES (*glow discharge optical emission spectrometry*).

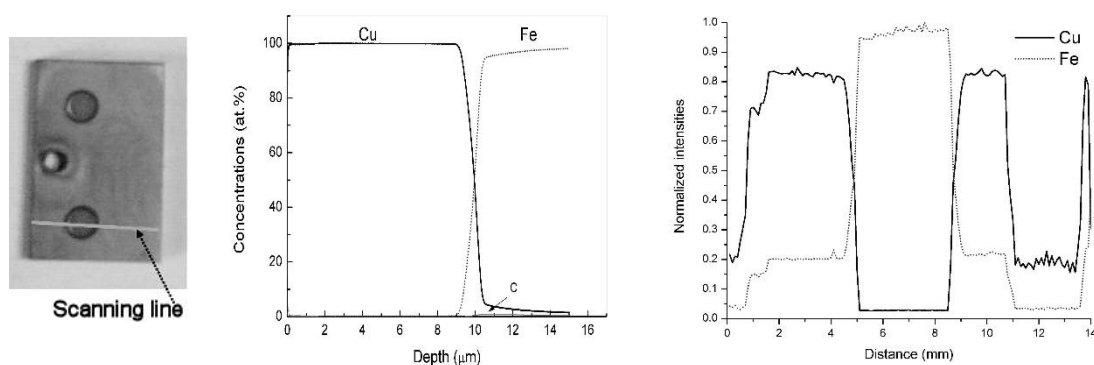


Figura 4.1. Proba de test (stânga), profil GDOES (mijloc) și analiza de fluorescență (dreapta)

Grosimea stratului de Cu s-a determinat cu o precizie de  $\sim 5\%$ .

După validarea metodei XRF, aceasta a fost aplicată pentru determinarea grosimii straturilor de acoperire a probelor CFC (*carbon fibre composite*) de la divertorul ASDEX-Upgrade. Rezultatele tipice ale analizei fluorescenței de raze X sunt prezentate în figura 4.2. Eșantionul are o zonă unde nu există depunere de wolfram. Pasul de scanare a fost de 2 mm.

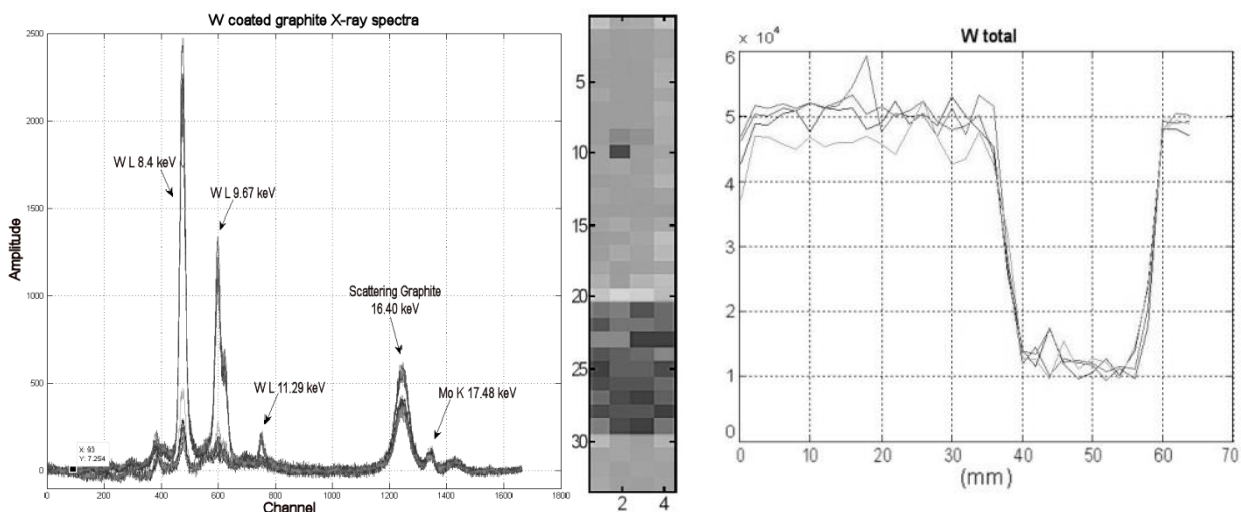


Figura 4.2. Analiza de fluorescență a unei plăci de carbon acoperită cu W, expusă la plasma de fuziune în cadrul ASDEX-Upgrade. Spectrele de fluorescență de raze X (stânga); Harta grosimii stratului de W (mijloc); Profile liniare de-a lungul hărții (dreapta)

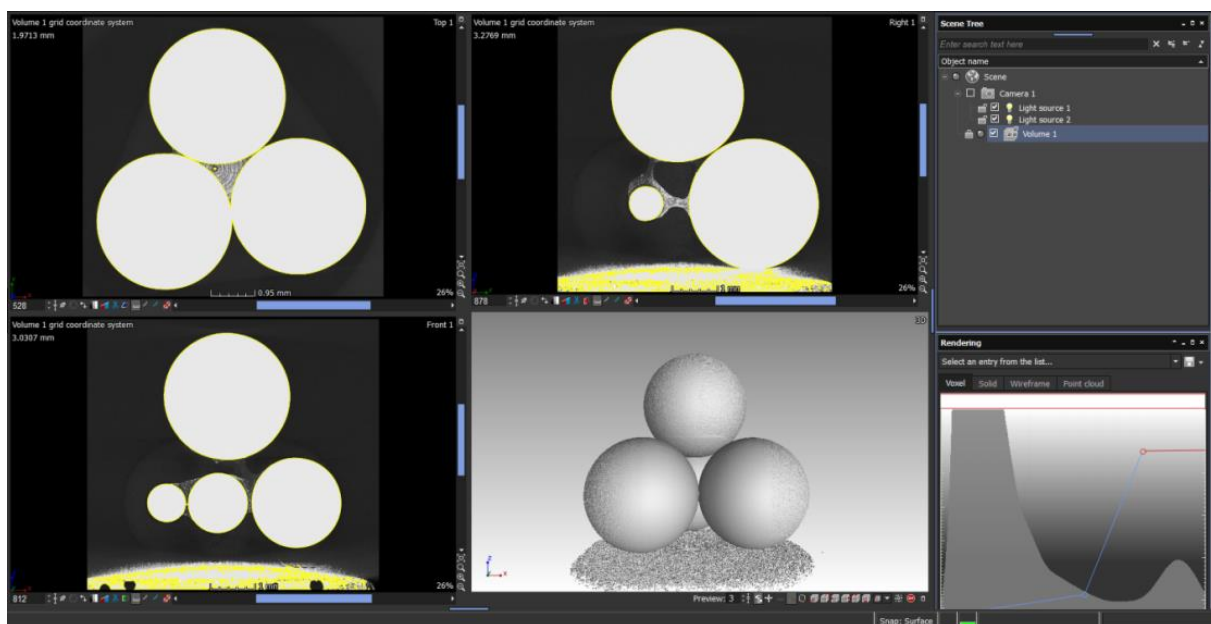
Testele experimentale au demonstrat că metoda este capabilă să ofere informații despre uniformitatea depunerii probelor CFC și poate fi utilizată pentru determinarea grosimii depunerilor cu rezoluție în profunzime de aproximativ 3% din grosimea stratului analizat.

### Analize de metrologie dimensională prin tomografie de raze X

Tomografia computerizată de raze X (XCT) reprezintă o metodă nedistructivă care permite inspecția internă 3D a obiectelor analizate, fiind din ce în ce mai des utilizată în industrie pentru monitorizarea și asigurarea controlului calității.

Pentru realizarea unor analize la scară micro (voxel volum reconstruit  $\sim 3 \mu\text{m}$ ) din reconstrucția CT, s-a realizat o probă etalon realizată din 4 bile de rubin sintetic cu diametre calibrate (diametrul sferei  $3 \text{ mm} \pm 2.5 \mu\text{m}$ , sfericitate  $0.64 \mu\text{m}$ ; finisajul suprafeței  $1.5 \mu\text{m-inch}$ ). Au fost realizate măsurători pe probă etalon cu 4 sfere la o rezoluție nominală de  $\sim 3.5 \mu\text{m/voxel}$ .

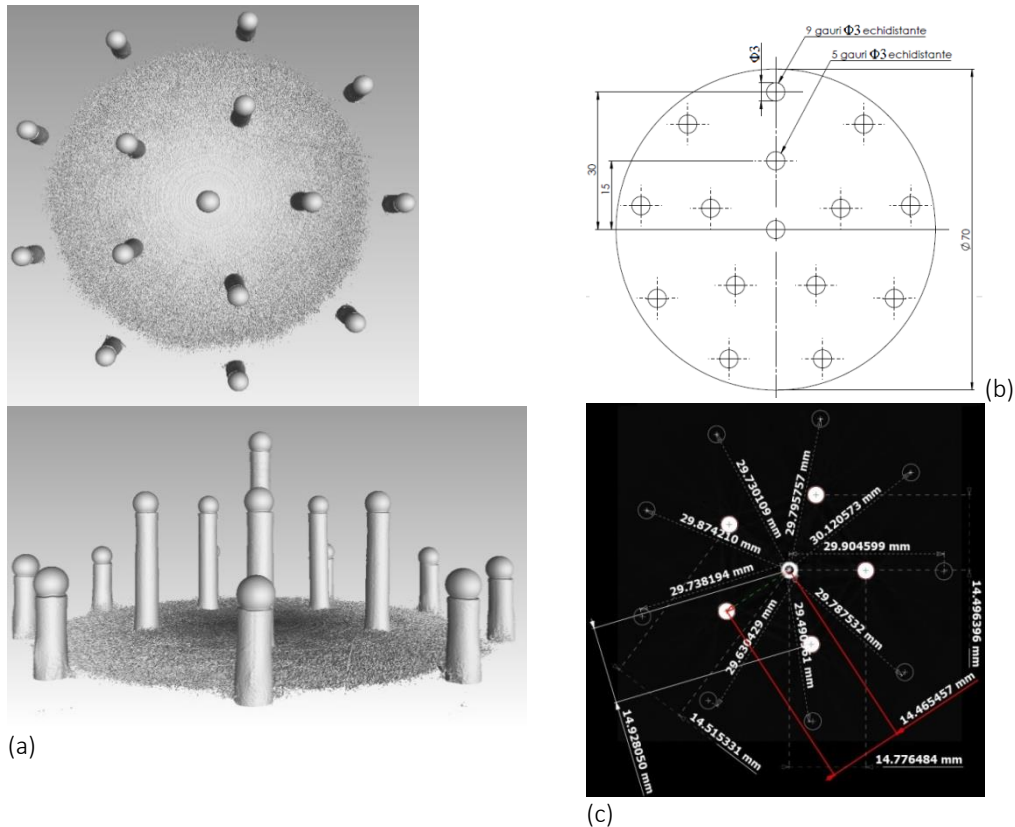
Măsurătorile de coordonate pe volumul reconstruit s-au realizat cu modulul de metrologie din pachetul de programe comercial *VGStudio Max 3.2*. (Fig. 4.3).



**Figura 4.3.** Măsurători de coordonate și formă cu programul VGStudio Max 3.2 pentru proba etalon cu 4 bile de rubin

În urma fitării suprafețelor sferelor au fost determinate valorile razelor celor 4 bile, abaterile de sfericitate și distanțele dintre centrele acestora, conducând la valori medii ale distanțelor între sferele aflate în contact cu diferențe între  $1/3 \div 1/5$  voxel (valoare voxel =  $3.8 \mu\text{m}$ ). Valori tipice de raze [mm] au fost: 1.5046, 1.5118, 1.5123, 1.5124 respectiv abaterea de la sfericitate de  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ .

Pentru calibrarea instrumentului privind realizarea unor analize la scară macro (dimensiuni caracteristice ale probelor de ordinul zecilor de milimetri și mai mari), am proiectat un etalon dimensional similar cu proba standard „*Metrotom Check Micro*” de la firma *Carl Zeiss*. Acesta a fost executat conform desenului tehnic din figura 4.4 (b).



**Figura 4.4.** Reconstrucție 3D vedere de sus și laterală (a); Desen tehnic de execuție (b); Măsurători dimensionale 3D (c)

Etalonul dimensional constă dintr-un suport de aluminiu pe care sunt fixate 15 sfere de safir sintetic (rubin) la înălțimi diferite, prin intermediul unor tuburi de carbon (Figura 4.4 a). S-au folosit bile de rubin de precizie cu diametru de 3 mm +/- 2.5 μm și sfericitatea 0.64 μm. Tuburile de carbon sunt cvasitransparente la raze X și au diametru de 3 mm.

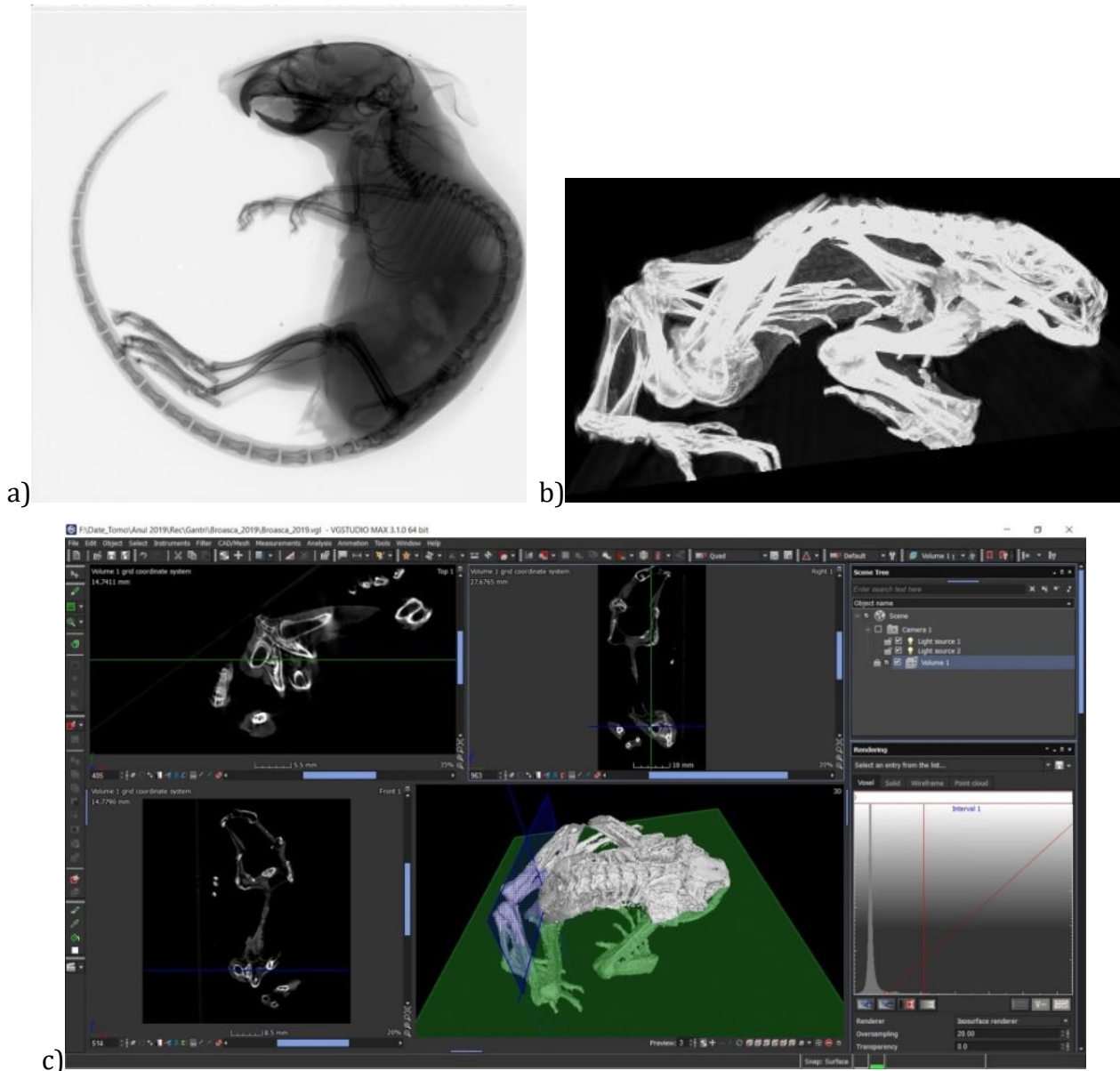
Valorile distanțelor dintre centrele sferelor au fost determinate atât prin metrologie optică (cu ajutorul unui sistem de metrologie *vision* Nikon iNEXIV VMA-2520) cât și prin tomografie. Media diferențelor dintre cele două metode a fost de 6.5 μm, cu o deviație standard de 14.9 μm. Aceste valori exprimate în fracțiuni de voxel reprezintă ~1/5 voxel cu o deviație standard < 1/2 voxel, în bun acord cu cele mai bune rezultate obținute cu alte sisteme metrologice de tomografie.

### Analize prin tomografie *gantry*

Modulul de tomografie *gantry* dezvoltat se pretează atât pentru analiza materialelor cât și pentru studiul neinvaziv al animalelor de dimensiuni mici, cu precădere șoricel de laborator.

Pentru exemplificarea aplicabilității acestui modul component al instrumentului dezvoltat, am realizat o radiografie a unui șoricel la următorii parametri: tensiune 40 kV, curent 900 μA, timp de integrare 0,5 s, medie de douăzeci imagini. (Fig. 4.5 a) și am tomografiat o broscuță de dimensiuni similare (Fig. 4.5 b, c).

Se constată că sistemele osoase sunt vizibile foarte clar. Organele interne, având o densitate apropiată, nu pot fi delimitate foarte clar. Pentru cazul particular când este necesară studiarea acestora, se urmărește creșterea contrastului prin administrarea unor substanțe speciale de contrast.



**Figura 4.5.** a) Radiografie șoricel. b, c) Reconstrucție tomografică animal de dimensiuni mici (broască).

Tomografia *gantry* se pretează foarte bine pentru studiul diferitelor procese. O probă care trece printr-un proces cel mai adesea nu poate fi mișcată / mutată. Deci poate fi așezată pe suportul de probe din cadrul *gantry* și scanată periodic, pe toată durata procesului. Un exemplu de proces ce poate fi astfel investigat este germinația semințelor.

În imaginea de mai jos (Fig. 4.6) este prezentată interfața programului VG Studio MAX cu reconstrucția 3D a două boabe de grâu germinate. Scopul a fost analiza eficacității unor substanțe menite să determine o germinație mai rapidă a grâului. Prin tomografiile repetate, se pot urmări și analiza etapele întregului proces germinativ.

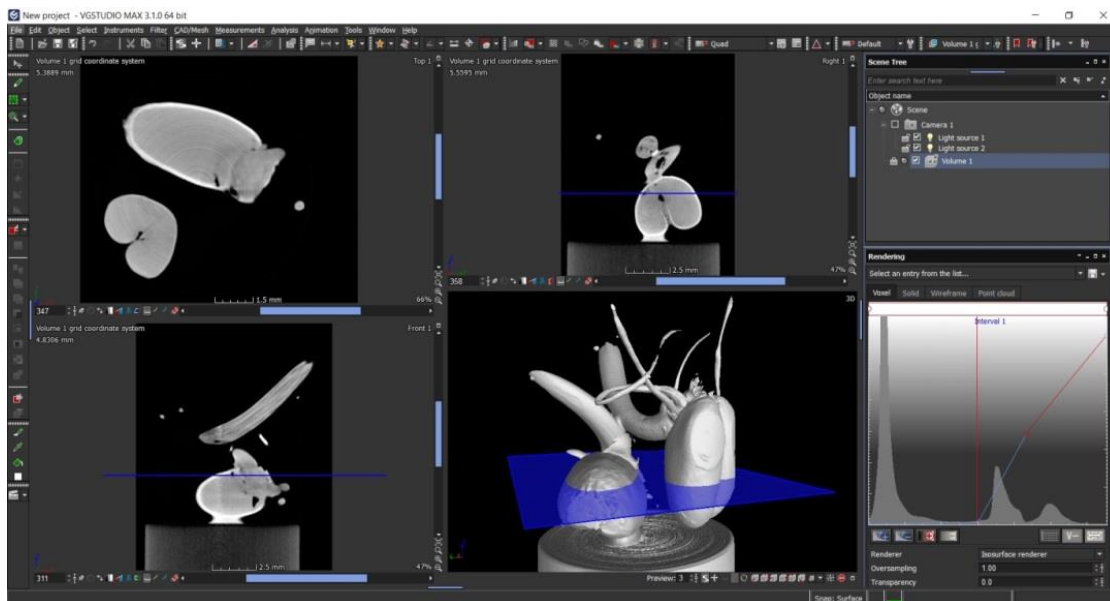


Figura 4.6. Reconstrucție tomografică a boabelor de grâu germinate.

## Aplicații de dozimetrie

Măsurarea radiațiilor (dozimetria) joacă un rol esențial în multe industrii în ceea ce privește asigurarea siguranței condițiilor de funcționare și de lucru, dar și în aplicațiile de radioterapie.

Au fost dezvoltati și analizați noi senzori cu fibră optică (Fig. 4.7 a), scintilatori de radiații X ce oferă măsurători de doză în timp real și numeroase avantaje față de alți senzori, cum ar fi costurile de producție asociate scăzute, precum și o bună repetabilitate a măsurătorilor cu raze X.

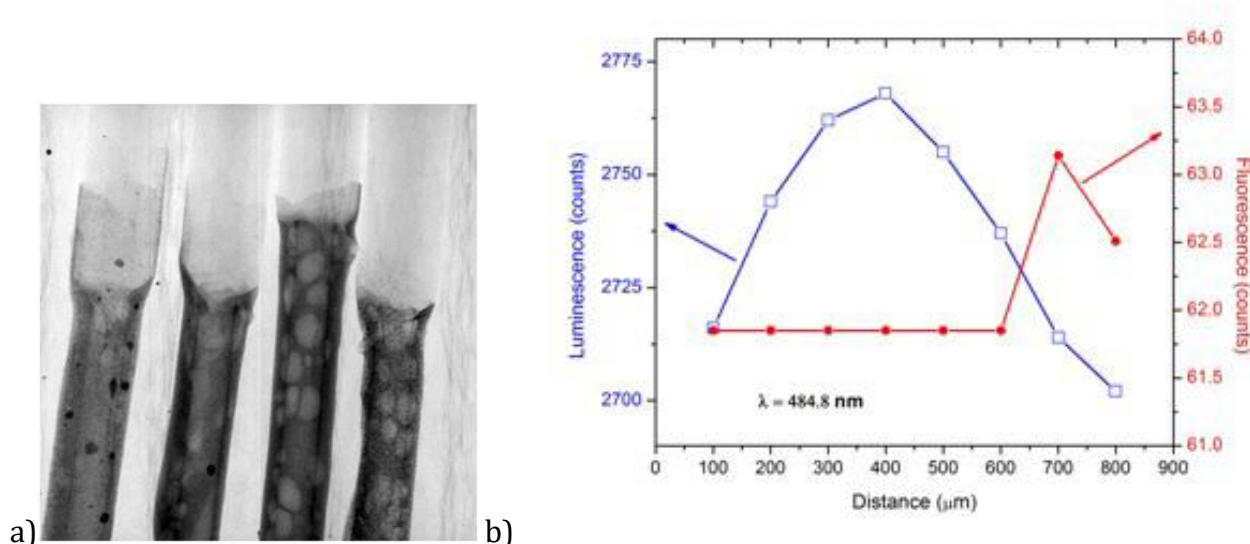


Figura 4.7. a) Micro-radiografia celor patru vârfuri ale senzorilor b) Distribuția radio-luminescenței și fluorescenței de raze X de-a lungul vârfului detector pentru senzorul cu fosfor GL47

Vârfurile de fosfor ale senzorilor de fibră optică au fost supuși iradierii cu raze X și semnalul de radio-luminescență generat în vârf a fost transmis printr-o fibră optică de plastic (POF) la un spectrometru științific. Pe lângă testele de sensibilitate spectrală, senzorii au fost

analizați pentru determinarea uniformității răspunsului de-a lungul suprafeței vârfului. Pentru această investigație, fiecare vârf a fost scanat de-a lungul unei linii paralele cu axa sa. În fiecare punct au fost înregistrate atât semnalele de fluorescență de raze X, cât și semnalele de radio-luminescență.

Lucrările efectuate au arătat răspunsuri ale emisiilor corespunzătoare așteptărilor pentru materialele scintilatoare de fosfor. S-a evaluat uniformitatea distribuției granulelor de fosfor de-a lungul vârfului sensorului. S-a constatat că uniformitatea semnalului de fluorescență de raze X pentru sensorul de tip GL47 este foarte bună pe o lungime de aproximativ 500 pm de la capătul sensorului (Fig 4.7 b).

## Concluzii și perspective

---

Teza sistematizează o parte din activitatea personală a autorului în domeniul cercetării științifice, desfășurată pe o perioadă de timp de peste 10 ani, prezentând contribuția acestuia la dezvoltarea unui sistem multifuncțional compact de imagistică de raze X, din perspectiva proiectării, dezvoltării, testării și validării acestui instrument.

Acest sistem de imagistică de raze X reprezintă un element de noutate, având un caracter multifuncțional, dat de îmbinarea a două tehnici de control nedistructiv, tomografia și fluorescența de raze X, pentru o caracterizare complexă, neinvazivă a materialelor, ansamblelor, componentelor și proceselor.

Teza este structurată pe patru capitole în care sunt prezentate bazele teoretice necesare pentru dezvoltarea sistemului multifuncțional compact de imagistică de raze X, contribuția autorului constând în proiectarea și dezvoltarea *hardware* și *software* și aplicații specifice prin care acest sistem a fost testat și validat.

Subiectul tezei a fost abordat metodic, iar la finalul lucrării s-a constatat că obiectivele propuse au fost atinse în totalitate, problemele survenite pe parcurs în oricare dintre etapele proiectării, dezvoltării și utilizării sistemului multifuncțional de imagistică de raze X fiind depășite metodic. Rezultatele obținute prin contribuția autorului reprezintă elemente de noutate și originalitate, confirmate de diseminarea prin intermediul a numeroase rapoarte, articole științifice și conferințe, dar și de acordarea a două diplome de excelență în cadrul Salonului Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii - PRO INVENT, Cluj-Napoca, Romania.

Domeniile de aplicabilitate ale instrumentului dezvoltat pot fi: cercetare – dezvoltare, industrie, electronică, medicină veterinară, geologie, agronomie, farmacie, dar și educație. Fiind un instrument mobil, de dimensiuni relativ reduse, se pretează pentru a fi folosit în cadrul universităților sau facultăților tehnice, ca material didactic pentru pregătirea studenților sau operatorilor din domeniu. Pe lângă mobilitate, importanța instrumentului este dată și de modularitatea acestuia, el putând fi folosit cu ușurință, adaptat și reconfigurat pentru a acomoda montaje experimentale variate. În ceea ce privește domeniul industrial, prin intermediul transferului tehnologic, adoptarea lui ar putea fi benefică în principal pentru controlul calității, prin posibila integrare în fluxul de producție.