

# CÁLCULO DE FRAÇÕES DE VOLUME EM SISTEMAS MULTIFÁSICOS BASEADOS EM RAIOS X

---

**César Marques Salgado**

**William Luna Salgado**

**Roos Sophia de Freitas Dam**

**Claudio de Carvalho Conti**

A formação do petróleo ocorre ao longo de milhões de anos em rochas sedimentares, tanto em áreas marinhas quanto terrestres. Considerado a principal fonte de energia do mundo moderno, o petróleo está presente em diversos produtos de uso diário, como diesel, gasolina, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo e querosene de aviação, além de compostos utilizados na fabricação de plásticos, tintas e borrachas, entre outros produtos. Devido à crescente demanda global, há um esforço contínuo para expandir a capacidade produtiva por meio do desenvolvimento de novos processos de extração e produção. No Brasil, grande parte das reservas de petróleo encontrase em campos *offshore* em

águas profundas, o que tem impulsionado a exploração em locais cada vez mais desafiadores. A descoberta de novas reservas requer pesquisas extensivas e o desenvolvimento de tecnologias avançadas para identificar bacias promissoras e determinar os melhores locais para perfuração. Antes da fase de produção, realiza-se a perfuração para confirmar a presença de hidrocarbonetos e avaliar a viabilidade comercial do poço de petróleo. Durante a extração, o petróleo é extraído juntamente com gás e água. Nas plataformas, esses fluidos são separados e enviados a terminais na costa brasileira, de onde seguem para as refinarias. O monitoramento da vazão de cada fase que escoa nas tubulações é essencial para o controle e otimização da produção. Tradicionalmente, separadores de teste gravitacionais são utilizados, mas esses equipamentos envolvem custos elevados, operação complexa e grande consumo de tempo.

Por outro lado, os medidores multifásicos oferecem uma solução mais eficiente, permitindo a medição de forma contínua e em tempo real, sem a necessidade de separar as fases. Essa tecnologia possibilita o gerenciamento dinâmico do desempenho dos poços, aumentando a eficiência e reduzindo os custos operacionais. Os medidores multifásicos fornecem parâmetros para o controle da produção, como a fração volumétrica de cada fase (líquida, gasosa ou sólida) e a velocidade superficial, otimizando a operação e garantindo maior segurança.

Diversas técnicas têm sido usadas para determinar frações volumétricas, incluindo métodos elétricos, ópticos, ultrassônicos e baseados em fótons. Entre essas, técnicas que utilizam transmissão e espalhamento de fótons se destacam por sua confiabilidade e caráter não invasivo. Estudos prévios demonstram o uso bem-sucedido da atenuação de raios gama para determinar frações de volume em sistemas multifásicos, utilizando simulações matemáticas validadas e técnicas de Inteligência Artificial para identificar regimes de fluxo e predizer a fração de volume [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Outros trabalhos abordaram a medição de velocidade das fases [7, 8] e a visualização de características do fluxo multifásico utilizando raios X [9].

A determinação da fração de volume e da velocidade é crucial para calcular a vazão de cada fase em tubulações. Métodos baseados em raios gama e raios X, com detectores de cintilação NaI(Tl), são amplamente utilizados para esse propósito, apresentando resultados satisfatórios, especialmente na medição de fração de vazio e distribuição de velocidade [10]. Geometrias de medição e radionucléidos variados, como <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>241</sup>Am, <sup>133</sup>Ba e <sup>152</sup>Eu, têm sido explorados em sistemas baseados em radiação. Essas fontes permitem a identificação de regimes de fluxo, determinação de frações volumétricas e medições de velocidade [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. No entanto, este estudo utiliza raios X provenientes de um tubo de raios X e detectores planares de germânio (HPGe). O tubo de raios X apresenta vantagens significantes em relação às fontes de raios gama: a energia dos raios X<sup>1</sup> pode ser ajustada conforme a voltagem aplicada ao tubo e, a intensidade do feixe pode ser controlada pela corrente elétrica aplicada. Além disso, o tubo pode ser desligado, reduzindo os requisitos de proteção radiológica, o que torna essa abordagem especialmente atraente para aplicações industriais.

Este estudo investiga o uso de um feixe de raios X em um regime de fluxo multifásico anular. A geometria de medição foi projetada e simulada no código MCNP6 [19]. Os dados obtidos foram utilizados para treinar uma rede neural *perceptron* multicamadas (MLP) com quatro camadas [20], capaz de predizer frações volumétricas. O modelo simulado no MCNP6 considera interações da radiação com os fluidos, distribuições de altura de pulso (DAPs) registrados por detectores planares HPGe, bem como suas resoluções em energia e curvas de eficiência. Além disso, as características e dimensões de detectores HPGe reais foram incorporadas no modelo [21].

1. Os raios X gerados em um tubo de raios X são produzidos quando um feixe de elétrons é acelerado por um intenso campo elétrico criado pela aplicação de alta voltagem entre os terminais do tubo. Ao colidir com um alvo metálico, esses elétrons acelerados transferem sua energia cinética, convertendo-a em radiação eletromagnética, predominante na faixa dos raios, além de emitir radiação térmica.

## SIMULAÇÃO DA GEOMETRIA

O código MCNP6 foi utilizado para simular a transmissão e o espalhamento de um feixe de raios X incidente em uma tubulação preenchida com fluidos típicos da indústria petrolífera, com objetivo de calcular a fração volumétrica em regime trifásico. O modelo geométrico simulado da geometria inclui dois detectores planares de HPGe, uma fonte de raios X de energia máxima de 149,5 keV e uma tubulação de policloreto de vinila (PVC) com diâmetro interno de 266 mm de espessura de parede de 4 mm. Um diagrama esquemático do sistema é apresentado na Figura 33. O modelo do detector incorpora tanto o cristal quanto os materiais estruturais [21]. As propriedades das fases líquida e gasosa simuladas são descritas na Tabela 5.

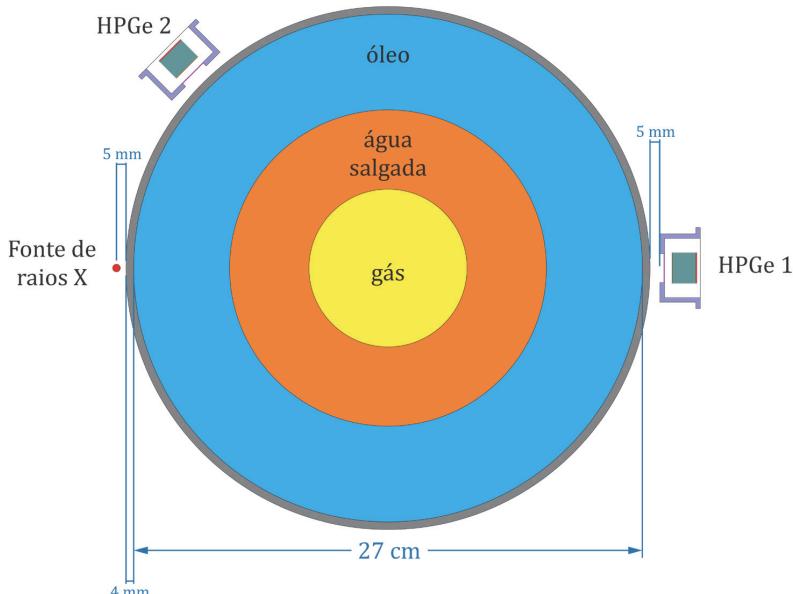


Figura 33 – Representação esquemática da geometria do sistema de detecção modelado no MCNP6.

Nas simulações, foi considerado o regime de fluxo anular, variando as frações volumétricas 0,1% a 97%, em incrementos de 5%. No total, 210 simulações foram realizadas, gerando o conjunto para o treinamento e avaliação de uma RNA.

O volume sensível de cada detector planar HPGe foi modelado como um cilindro de 16 mm de diâmetro e 13 mm de espessura, sendo particularmente eficaz para espectrometria de raios X. Na Figura 3, é mostrada a estrutura do detector HPGe considerada nas simulações.

O cristal de germânio inclui camadas mortas em ambas as superfícies planas do cilindro, que atuam como contatos ôhmicos e permitem a polarização elétrica. Essas camadas são compostas por:

- I. Camada P+: Implante de íons de boro com 0,5 µm na face frontal;
- II. Camada N+: Difusão de lítio com 600 µm na face posterior.

Essas camadas mortas, juntamente com a janela de berílio extremamente fina no encapsulamento frontal foram consideradas devido à sua influência significativa na eficiência do sistema de detecção, causada pela forte atenuação do feixe de radiação incidente. Essas características tornam os detectores planares adequados para medições na faixa de energia utilizada neste estudo.

No MCNP6, o comando *Tally F8* foi utilizado para registrar os fótons que atingiram o cristal do detector. Para garantir a precisão, foram simulados  $1 \times 10^8$  fótons, resultando em um erro relativo inferior a 10% para cada canal do espectro de energia. Além disso, a resolução de energia do detector foi incorporada, usando o comando GEB (*Gaussian energy broadening*), que utiliza os coeficientes de calibração descritos na Equação 13.

O espectro de raios X de entrada para as simulações foi gerado por software específico [22] e reflete as propriedades do tubo de raios X, com as seguintes características:

- Alvo de tungstênio inclinado a 20 graus;
- Filtração inerente de 1 mm de Be;
- Filtração adicional de 1 mm de Al;
- Fótons de energia máxima de 149,5 keV.

Para melhorar a precisão das simulações, foi incluída uma colimação estreita no feixe de raios X.

## TREINAMENTO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A fase de treinamento utilizou uma RNA do tipo MLP com o algoritmo de retropropagação de erros. Os dados de entrada para a RNA consistiram nos espectros obtidos pelos detectores HPGe, divididos em 150 canais de 1 keV. A saída foi definida como a fração volumétrica de gás e água, sendo a fração da terceira fase calculada como o complemento necessário para totalizar 100%.

Para a construção do conjunto de dados, 210 padrões diferentes foram simulados utilizando o código MCNP6. Eses padrões foram distribuídos em três subconjuntos: 147 (70%) para o treinamento, 42 casos (20%) para teste e 21 (10%) para validação (10%). O subconjunto de validação foi usado para avaliar a eficiência da RNA após o processo de treinamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os espectros registrados nos detectores a partir das simulações permitem que a RNA calcule as frações volumétricas dos fluidos (FVF) – gás, água e óleo – no regime de fluxo anular. Como exemplo, na Figura 34 são apresentados os espectros registrados para duas condições distintas de FVF:

- FVF1 - 12% gás + 25,1% água + 62,9% óleo;
- FVF2 - 32% gás + 50,1% água + 17,9% óleo.

Os espectros abrangem uma faixa de energia de 0,5 keV a 149,5 keV, dividida em 150 canais de 1 keV.

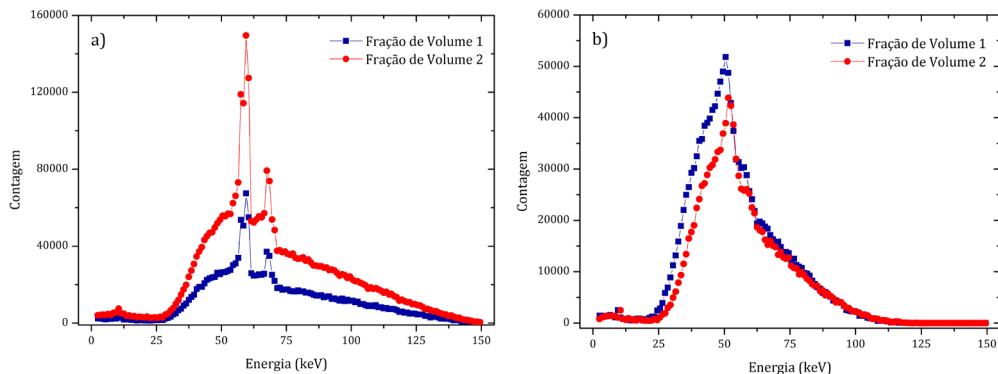


Figura 34 – Espectros de energia obtidos em detectores HPGe para duas frações volumétricas distintas de gás, água e óleo: a) Detector 1; b) Detector 2.

A RNA que apresentou os melhores resultados possui 4 camadas: uma camada de entrada, duas camadas ocultas e uma camada de saída. Os parâmetros otimizados da RNA estão apresentados em Tabela 11.

PARÂMETRO	CAMADA			
	Entrada	Oculta	Gaussiano Comp.	Saída
Funções de ativação	Linear [-1, 1]*	Gaussiano	Gaussiano Comp.	Logística
Neurônios	300	76	76	2

Tabela 11 – Parâmetros que forneceram os melhores resultados na configuração da RNA

\* A função linear foi utilizada como normalizadora dos dados de entrada.

Os diagramas de regressão entre os dados simulados e preditos para frações volumétricas de gás e água são apresentados em Figura 35, indicando boa concordância com altos coeficientes de regressão.

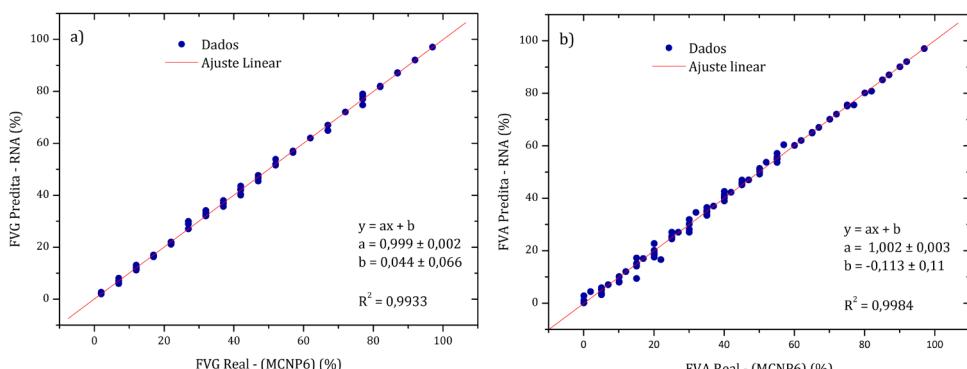


Figura 35 – Diagrama de regressão comparando os resultados simulados e os valores preditos pela RNA para a fração volumétrica de: a) gás; b) água.

Na Figura 36 é apresentada a comparação entre os dados simulados e preditos para o subconjunto Validação (VAL). Observa-se que a RNA conseguiu boa convergência mesmo com dados não utilizados durante o treinamento.

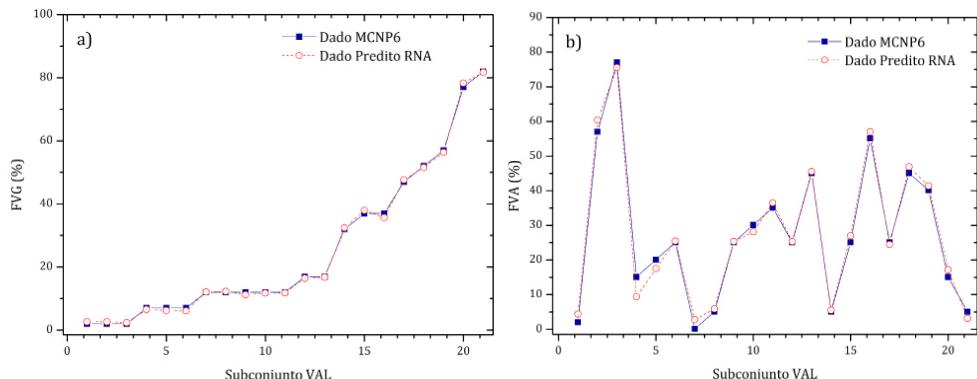


Figura 36 – Comparação entre dados simulados e as previsões da RNA para o subconjunto Validação considerando as frações de volume de: a) gás; b) água.

Na Tabela 12 é apresentado um resumo da comparação entre os valores reais (obtidos por simulação) e os valores preditos pela RNA. A análise mostra que, para a maioria dos casos, a RNA obteve resultados com boa precisão, com mais de 87% dos resultados apresentando erros relativos abaixo de 5%.

Faixa de classificação de erro	Fração de volume (%)	
	gás	água
≤ 5%	91,44	87,62
5%-10%	3,33	5,24
10%-20%	3,33	3,33
20%-30%	0,95	1,43
>30%	0,95	2,38

Tabela 12 – Classificação de erro relativo dos padrões preditos pela RNA para as frações volumétricas de gás e água

Uma análise estatística final do desempenho da RNA é apresentada na Tabela 13. Os valores de MRE (%) para todos os dados foram de 1,72% para gás e 2,48% para água, respectivamente. A comparação entre RMSE e MAE revela que a grande maioria dos resultados apresenta pequenos desvios, já que os valores de RMSE são superiores aos de MAE. Os poucos padrões com erros significativos ocorrem, principalmente, para frações de volume muito baixas, o que impacta negativamente a qualidade dos resultados no subconjunto de Validação. Esse efeito é refletido no aumento do valor do MRE.

Conjunto de dados	Métrica							
	FVG				FVA			
	MAE	MSE	RMSE	MRE	MAE	RMSE	MSE	MRE
Todos os dados	0,2349	0,3112	0,5578	1,72%	0,4080	0,9367	0,9678	2,48%
TRT	0,2370	0,2904	0,9678	2,48%	0,4702	1,1656	1,0796	2,76%
TST	0,8846	1,3351	1,1555	5,21%	1,1929	2,4645	1,5699	5,51%
VAL	0,5746	0,4414	0,6643	6,80%	1,6901	4,4381	2,1067	13,68%

Tabela 13 – Análise de predição de rede usando parâmetros estatísticos

## CONCLUSÕES

Neste estudo de caso, um sistema de medição de frações volumétricas de fluidos em um sistema trifásico foi proposto, utilizando um feixe de raios X com fótons de 149,5 keV e detectores HPGe. O sistema foi simulado com o código MCNP6, e uma RNA MLP foi utilizada para interpretar os espectros registrados nos detectores. O regime de escoamento anular foi considerado com diferentes frações volumétricas de fluido.

Os espectros registrados nos detectores foram utilizados diretamente como dados de entrada na RNA. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, com mais de 87% dos padrões apresentando erro relativo abaixo de 5% para ambas as fases investigadas. Os valores de MRE (%) para gás e água foram 1,72% e 2,48%, respectivamente.

De maneira geral, os resultados das métricas indicam que a metodologia proposta é aplicável para medir frações volumétricas em sistemas trifásicos, especialmente em regime de fluxo anular, utilizando um feixe de raios X. Além disso, a possibilidade de desligar a fonte de radiação, reduzindo assim os critérios de proteção radiológica, é um diferencial significativo dessa abordagem.

## REFERÊNCIAS

- [1] Åbro, E.; Khoryakov, V.A.; Johansen, G.A.; Kocbach, L. Determination of void fraction and flow regime using a neural network trained on simulated data based on gamma-ray densitometry. *Measurement Science and Technology*, v. 10, p. 619-630, 1999.
- [2] Salgado, C.M.; Pereira, C.M.N.A.; Schirru, R.; Brandão, L.E. Flow regime identification and volume fraction prediction in multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks. *Progress in Nuclear Energy*, v. 52, p. 555-562, 2010.
- [3] Nazemi, E.; Roshani, G.H.; Feghhi, S.A.H.; Gholipour Peyvandi, R.; Setayeshi, S. Precise Void Fraction Measurement in Two-Phase Flows Independent of the Flow Regime using gamma-ray attenuation. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 48, p. 64-71, 2016.
- [4] Karami, A.; Roshani, G.H.; Khazaei, A.; Nazemi, E.; Fallahi, M. Investigation of different sources in order to optimize the nuclear metering system of gas–oil–water Annular flows. *Neural Computing and Applications*, p. 1-13, 2018.

- [5] Rad Islami, S.Z.; Gholipour Peyvandi, R. Precise volume fraction measurement for three-phase flow meter using  $^{137}\text{Cs}$  gamma source and one detector. *Radiochimica Acta*, v. 108, n. 2, p. 159-164, 2019.
- [6] Sattari, M.A.; Roshani, G.H.; Hanus, R. Improving the structure of two phase flow meter using feature extraction and GMDH neural network. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 171, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108725>
- [7] Mosorov, V. Improving the accuracy of single radioactive particle technique for flow velocity measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 66, p. 150-156, 2019.
- [8] Mosorov, V.; Zych, M.; Hanus, R.; Sankowski, D.; Saoud, A. Improvement of Flow Velocity Measurement Algorithms Based on Correlation Function and Twin Plane Electrical Capacitance Tomography, *Sensors*, v. 20, n. 1:306, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20010306>
- [9] Heindel, T.J., 2011. A review of X-ray flow visualization with applications to multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering*, v. 133, n. 7, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4004367>
- [10] Song, K.; Liu, Y. A compact x-ray system for two-phase flow measurement. *Measurement Science and Technology*, v. 29, n. 2, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaa283>
- [11] Halstensen, M.; Amundsen, L.; Arvohm, B.K. Three-way PLS regression and dual energy gamma densitometry for prediction of total volume fractions and enhanced flow regime identification in multiphase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 40, p. 133-141, 2014.
- [12] Hanus, R. Application of the Hilbert Transform to measurements of liquid–gas flow using gamma ray densitometry. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 72, p. 210-217, 2015.
- [13] Hanus, R.; Zych, M.; Petryka, L.; Swisulski D.; Strzepowicz, A. Application of RNA and PCA to two-phase flow evaluation using Radioisotopes, EPJ Web of Conferences, v. 143, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714302033>
- [14] Hanus, R.; Zych, M.; Kusy, M.; Jaszczur M.; Petryka, L. Identification of liquid-gas flow regime in a pipeline using gamma-ray absorption technique and computational intelligence methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 60, p. 17-23, 2018.
- [15] Mosorov, V.; Zych, M.; Hanus, R.; Petryk, L. Modelling of dynamic experiments in MCNP5 environment. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 112, p. 136-140, 2016.
- [16] Zych, M.; Hanus, R.; Vlasák, P.; Jaszczur, M.; Petryka, L. Radiometric methods in the measurement of particle-laden flows. *Powder Technology*, v. 318, p. 491-500, 2017.
- [17] Falahati, M.; Rashidian Vaziri, M.R.; Beigzadeh, A.M.; Afarideh, H. Design, modelling and construction of a continuous nuclear gauge for measuring the fluid levels. *Journal of Instrumentation*, v. 13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/P02028>
- [18] Hosseini, S.; Roshani, G.H.; Setayeshi, S. Precise gamma based two-phase flow meter using frequency feature extraction and only one detector. *Flow Measurement and Instrumentation*, v.72, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101693>

[19] Goorley, T.; James, M.; Booth, T.; Brown, F.; Bull, J.; Cox, L.J.; Durkee, J.; Elson, J.; Fensin, M.; Forster, R.A.; Hendricks, J.; Hughes, H.G.; Johns, R.; Kiedrowski, B.; Martz, R.; Mashnik, S.; McKinney, G.; Pelowitz, D.; Prael, R.; Sweezy, J.; Waters, L.; Wilcox, T.; Zukaitis, T. Features of MCNP6. *Annals of Nuclear Energy*, v. 87, p. 772-783, 2016.

[20] Haykin, S. Neural Networks – A Comprehensive Foundation. Macmillan College Publishing Company, 1994.

[21] Salgado, C.M.; Conti, C.C.; Becker, P.H.B. Determination of HPGe detector response using MCNP5 for 20–150 keV X-rays. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 64, p. 700-705, 2006.

[22] Cranley, K.; Gilmore, J.B.; Fogarty, A.W.G.; Desponds, L. Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data. *The Institute of Physics and Engineering in Medicine*. Report n. 78, 1997.