



**Progetto TECHEA - Technologies for Health  
WorkPackage WP2**

**Rapporto tecnico relativo alla progettazione del sistema**

**DELIVERABLE 2.1**

*Concetta Ronsivalle, Giulia Bazzano, Fabio Borgognoni,*

*Paolo Nenzi, Luigi Picardi, Monia Vadrucci*

FSN-TECFIS-APAM, Frascati

## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>COMPONENTI DEL SISTEMA PRESENTI NEL LABORATORIO APAM</b> .....	<b>4</b>
<b>ATTIVITÀ SVOLTE NEL PRIMO ANNO</b> .....	<b>5</b>
<b>APPENDICE A: CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA CONSOLE DI GESTIONE MACCHINA (CGM)</b> .....	<b>10</b>
<b>APPENDICE B. SPECIFICHE TECNICHE DEL MODULATORE DEL MAGNETRON</b> .....	<b>13</b>
<b>ANNEX A – TERMS</b> .....	<b>13</b>
<b>A.1 - BACKGROUND</b> .....	<b>13</b>
<b>A.2 - WORK TO BE PERFORMED</b> .....	<b>13</b>
<b>A.3 - LIST OF ABBREVIATIONS</b> .....	<b>13</b>
<b>ANNEX B – TECHNICAL SPECIFICATION FOR THE DESIGN, CONSTRUCTION AND TEST OF A HIGH VOLTAGE SOLID STATE PULSED MODULATOR FOR THE PMP PROJECT</b> .....	<b>14</b>
<b>B.1 – ENEA 400 V MAINS LINE NETWORK SPECIFICATION</b> .....	<b>14</b>
<b>B.2 – MODULATOR CONFIGURATION</b> .....	<b>15</b>
B2.1 – POWER SECTION .....	15
B2.2 – SWITCHING SECTION .....	15
B2.3 – MAGNETRON OIL TANK .....	15
B2.4 – SERIES OF POWER SUPPLIES .....	15
B2.5 – LOW POWER SECTION.....	15
<b>B.3 – MODULATOR FUNCTIONS</b> .....	<b>16</b>
B3.1 – MECHANICAL FRAMEWORK.....	16
B3.2 – PULSE GENERATOR .....	16
B3.3 – HEATER BIAS.....	17
B3.4 – SYSTEM COOLING .....	18
B3.5 – CONTROL SYSTEM.....	18
B3.6 – HARDWARE INTERLOCK SYSTEM .....	19
<b>B.4 – CONSTRUCTION AND ASSEMBLY OF THE PULSED MODULATOR</b> .....	<b>20</b>
<b>B.5 – DOCUMENTATION</b> .....	<b>20</b>

<b>B.6 – APPLICABLE STANDARDS .....</b>	<b>22</b>
<b>B.7 PULSE SHAPE DEFINITIONS .....</b>	<b>23</b>
<b>ANNEX D – REFERENCE DOCUMENTATION .....</b>	<b>24</b>

## INDICE DELLE TABELLE E DELLE FIGURE

Figura 1. (a) Linac da 3 MeV, cannone elettronico, pompa da vuoto. A fianco elettronica relativa al pilotaggio del cannone elettronico (b) Magnetron con il suo elettromagnete .....	5
Figura 2a. Layout del sistema rotante (posizione A) .....	6
Figura 3 - Tavola col disegno quotato. ....	7
Figura 4. Foto del modulatore M100-i .....	9
Figura 5. Dimensioni geometriche e pesi delle due parti di cui si compone il modulatore M100-i. ....	9
Figura 6. Figure 1 - Magnetron pulse shape definitions .....	23
Tabella 1 - Specifiche funzionali - Segnali di comando dalla CGM alla macchina .....	10
Tabella 2 Specifiche funzionali - Segnali di feedback dalla macchina alla CGM .....	10
Tabella 3 Specifiche dei segnali CGM_1 .....	11
Tabella 4 - Table 2 - 400 V mains line network specification .....	14
Tabella 5 - Table 3 – Mechanical framework specification .....	16
Tabella 6 - Table 4 – Magnetron pulse shape specification .....	17
Tabella 7 - Table 5 – Heater bias specification .....	17
Tabella 8 - Table 6 – Modulator control system requirements .....	18
Tabella 9 - Table 7 – Minimum set of control signals provided by the modulator .....	19
Tabella 10 - Table 8 – Minimum set of control signals provided by the modulator .....	20
Tabella 11 - Table 9 – Documentation that shall be provided with the offer .....	20
Tabella 12 - Table 10 – Documentation that shall be provided with the modulator .....	22
Tabella 13 - Table 11 – CE marking .....	22
Tabella 14 - Table 12 – Compliance .....	22

## **Introduzione**

Obiettivo del workpackage TECHEA-WP2 è lo sviluppo di un sistema per radioterapia basalo su acceleratore lineare compatto di elettroni da 3 MeV, con generazione di raggi X secondari, per un efficace irraggiamento dei tumori al seno – la geometria del generatore compatto di raggi X proposto consente lo sviluppo di un sistema di irraggiamento laterale ottimizzato attraverso un lettino attrezzato ove la paziente prona possa esporre la sola mammella al fascio di radiazioni ionizzanti, limitando così gli eventuali danni collaterali ai tessuti circostanti.

Alcuni componenti del sistema sono già presenti in ENEA in quanto sviluppati nell'ambito di un programma condotto in passato da IFO sulla base di un finanziamento del Ministero della Salute per il quale l'ENEA progettò un acceleratore compatto a radiofrequenza operante in banda S dedicato all'applicazione specifica. Essi sono custoditi dal 2016 presso il Laboratorio APAM dell'ENEA dietro richiesta dell'IFO, che non fu in grado di completare il Progetto. Il Progetto TECHEA consentirà di realizzare i componenti che mancano per il completamento del sistema e di effettuare i primi test sperimentali in zona radioprotetta.

Il primo anno di TECHEA-WP2 è stato dedicato alla progettazione del sistema e alla acquisizione dei componenti necessari alla effettuazione dei primi test sperimentali con il fascio di elettroni previsti per la metà del secondo anno.

### **Componenti del sistema presenti nel Laboratorio APAM**

Riportiamo in figura 1 le foto dei principali componenti del sistema presenti nel laboratorio APAM:

- 1- linac con cannone elettronico e pompa da vuoto
- 2- magnetron
- 3- elettronica del cannone

Ad essi va aggiunto il circolatore non mostrato in figura.

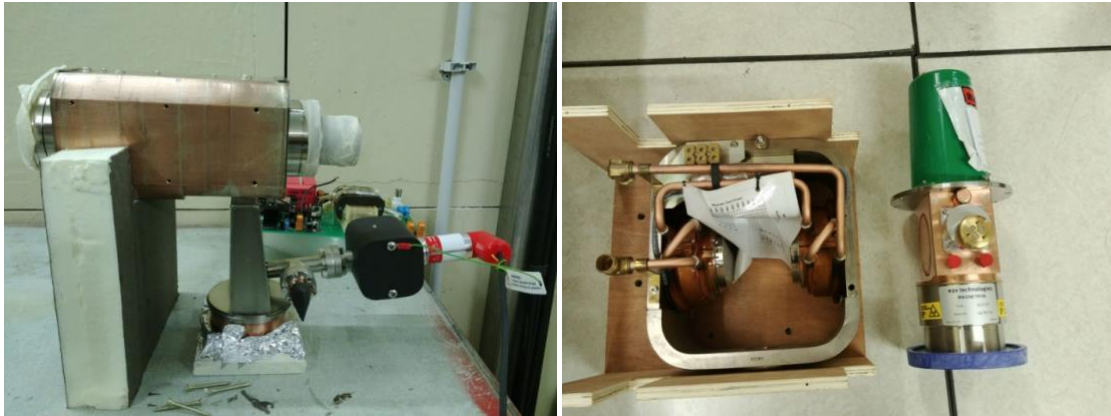


Figura 1. (a) Linac da 3 MeV, cannone elettronico, pompa da vuoto. A fianco elettronica relativa al pilotaggio del cannone elettronico (b) Magnetron con il suo elettromagnete

## Attività svolte nel primo anno

Nel primo anno di Progetto sono state effettuate le seguenti attività:

1. E' stato definito il layout generale del sistema prototipale che si intende realizzare. Esso è composto da un tavolo, sul quale giace la paziente, dotato di un'apertura circolare attraverso cui passa il "target" tumorale, sotto il quale è collocata una sorgente di fotoni rotante schermata. La sorgente è costituita da un piccolo acceleratore lineare di elettroni di energia 3 MeV progettato da ENEA e già realizzato che verrà provvisto di un convertitore beta-gamma, un filtro diffusore e un collimatore e montato su una struttura girevole attorno a un asse. Il linac, il convertitore, il filtro diffusore e il collimatore sono tutti schermati da una camicia esterna di piombo destinata a contenere la dose diffusa al di sotto dei limiti massimi consentiti per operatori posti al di fuori dei bunkers di radioterapia, in modo da poter utilizzare la macchina in un comune reparto di radiologia. La distanza sorgente-asse (SAD) deve essere tra 60 e 70 cm, sia per rispondere alla esigenza di compattezza che è una caratteristica chiave per un sistema di questo tipo sia perchè corrisponde a una curva PDD (Percentage Dose Depth) che consente di coprire in maniera molto simile a quella di una unità a  $^{60}\text{Co}$  lo spessore di un target di medie dimensioni (10-12 cm). L'acceleratore verrà equipaggiato con un collimatore multi-leaf di tipo commerciale per conformare il campo alla dimensione e forma del target.

Sulla base di tale schema è stato effettuato il **disegno del supporto** per l'acceleratore basato sull'impiego di profilati Bosch-Rexroth e relativi accessori (in corso di acquisto, verranno riportati

fra le spese del secondo anno) funzionale ai primi test di macchina. In figura 2a e 2b è riportato il sistema rotante in due possibili posizioni al di sotto del lettino (in giallo).

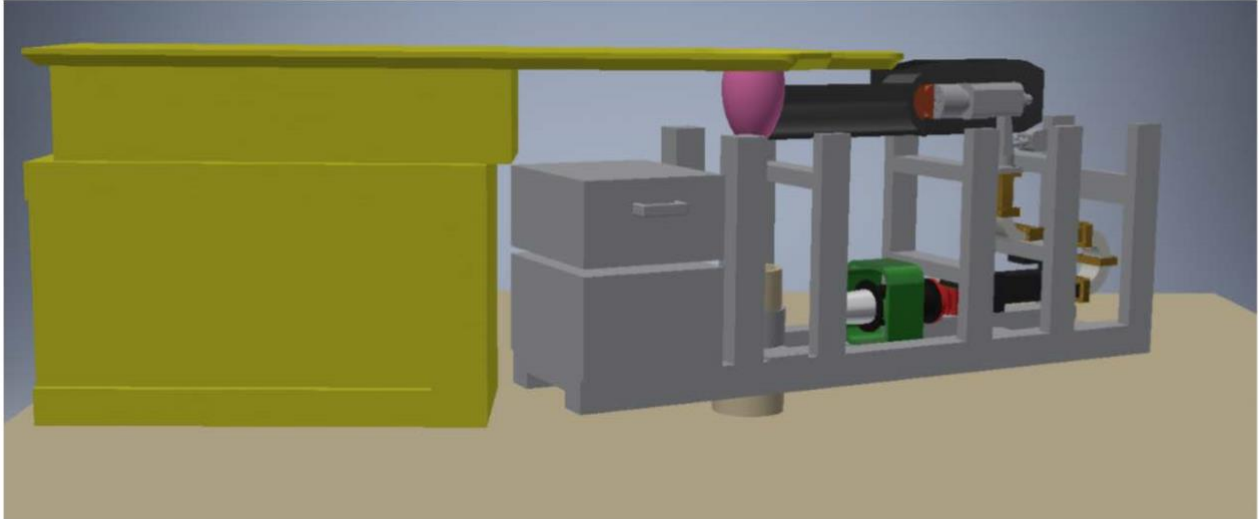


Figura 2a. Layout del sistema rotante (posizione A)

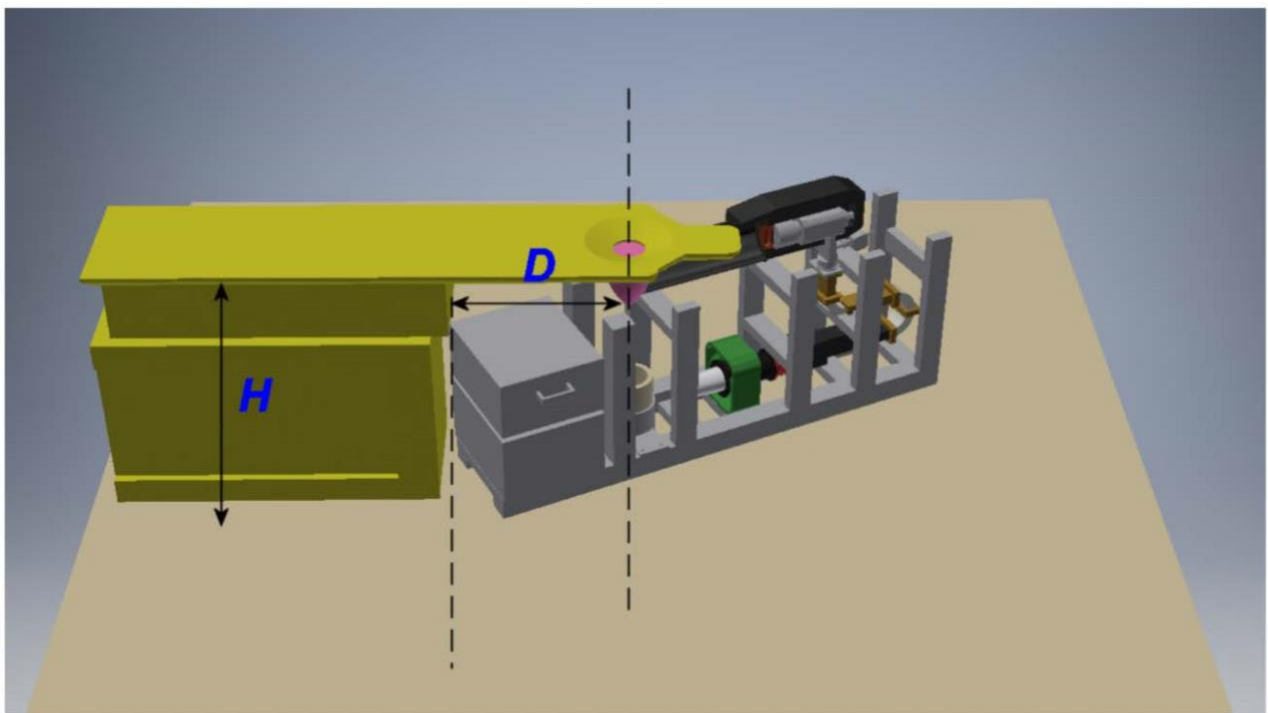


Figura 2 b. Layout del sistema rotante (posizione B)

Nella figura 2b sono state evidenziate due dimensioni chiave indicate con D e H: D è la distanza tra l'asse di rotazione (e della mammella) e il bordo della base del lettino. Tale distanza deve essere la massima compatibilmente con la precisione del posizionamento del paziente a sbalzo. Essa determina gli ingombri del carico del contrappeso, in quanto i pesi sono distribuiti nel supporto della macchina in modo bilanciato così da ottenere una agevole rotazione. Il contrappeso viene effettuato

dal modulatore (che pesa più di 100 kg). H è la distanza della parte inferiore del lettino che è a sbalzo e determina lo spazio in verticale disponibile per l'inserimento della macchina.

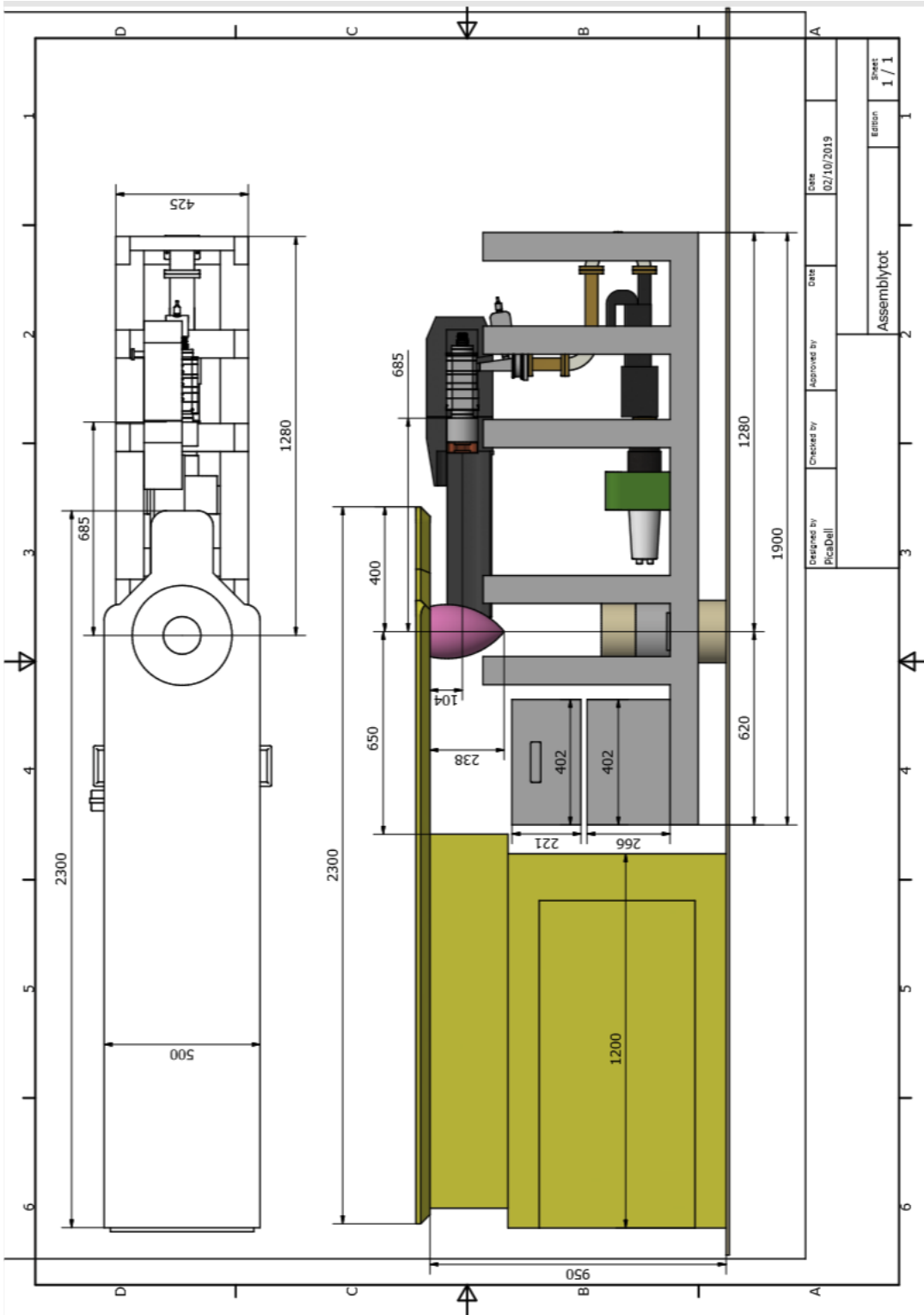


Figura 3 - Tavola col disegno quotato.

2. La definizione delle specifiche dei componenti necessari al completamento e alla messa in opera dell'acceleratore lineare. In particolare:

2.1. Sono state definite le caratteristiche della **console di gestione macchina (CGM)** in collaborazione con la ditta SIT di Aprilia che sviluppa sistemi analoghi per le macchine di radioterapia Intraoperatoria (IORT). Le specifiche tecniche funzionali della CGM e le caratteristiche dei relativi segnali sono riassunte nelle tabella A1 e A2 dell'appendice A. La consegna da parte della ditta è prevista per la fine del 2019.

2.2. Sono state definite le specifiche del **modulatore** da impiegarsi per il pilotaggio del magnetron MG5125 della e2v da 2MW già in dotazione. Esso impiegherà la tecnologia a stato solido e dovrà pilotare il magnetron ad una frequenza di ripetizione di 200 Hz. Esso sarà composto da due parti: la prima accumula l'energia elettrostatica necessaria e carica ad una tensione in DC dell'ordine del kV i moduli IGBT che sono degli interruttori a stato solido ad alta potenza, i quali pilotati da un trigger esterno producono un impulso di tensione e la seconda è costituita da un trasformatore d'impulso che ha il compito di innalzare la tensione ai valori richiesti dal magnetron.

E' stata effettuata una indagine di mercato da cui è emerso che i modulatori adatti per il nostro tipo di magnetron svolgono queste funzioni in due unità separate.

Inoltre le esigenze di compattezza del sistema sopra descritto in cui il dispositivo va inserito richiedono che le misure di ciascuna di queste due unità siano contenute entro i seguenti limiti:

- una lunghezza inferiore a 540 mm
- una larghezza inferiore a 410 mm
- un'altezza inferiore a 270 mm

Il dettaglio delle specifiche tecniche è riportato nella appendice B.

Sulla base della definizione di tali specifiche è stata avviata una gara che si è conclusa in settembre 2019 con l'assegnazione dell'appalto alla ditta DIMAC RED Spa (rappresentante in Italia della ditta svedese SCANDINOVA). Le caratteristiche del modulatore (modello M100-i rispondono pienamente alle specifiche richieste.





Figura 4. Foto del modulatore M100-i

Esso si compone di due parti denominate pulse unit e tank unit, le cui dimensioni geometriche e peso sono riportate in figura 4.

	Puls Unit M100-i	Tank Unit M100-i
<b>Size</b>	L x W x H: 462mm x 402mm x 221mm	L x W x H: 528mm x 402mm x 266mm
<b>Weight</b>	Approx. 80kg	Approx. 49kg

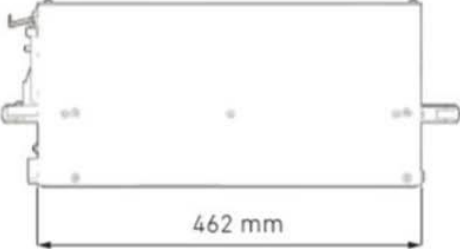
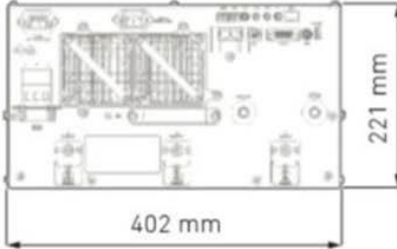
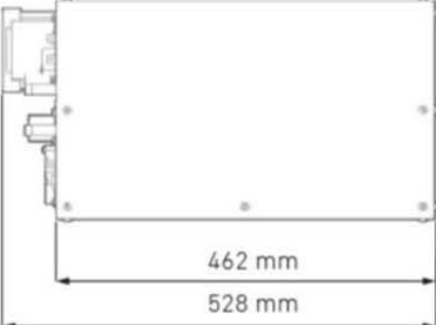
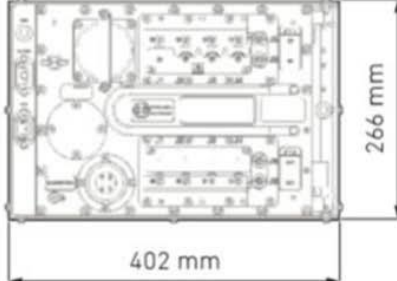
PULSE UNIT:		
		

Figura 5. Dimensioni geometriche e pesi delle due parti di cui si compone il modulatore M100-i.

2.3. E' stato individuato sul mercato e acquistato il **sistema di termoregolazione** della struttura accelerante in grado di mantenere la variazione di temperatura al di sotto di 0.1°C corrispondente ad una variazione di frequenza di risonanza al di sotto di 5KHz.

## APPENDICE A: caratteristiche tecniche della Console di Gestione Macchina (CGM)

Tabella A1.2 Specifiche funzionali

### Segnali di comando della CGM alla macchina

N° segnale	Descrizione
TX0	Segnale di ON-OFF
TX1	Accensione HVPS
TX2	Impulso al thyatron
TX3	Regolazione corrente di elettromagnete
TX4	Tensione di picco al cannone elettronico
TX5	Impulso al cannone elettronico
TX6	Programmazione posizione angolare acceleratore
TX7	Programmazione UM per angolo di irraggiamento
TX8	Attivazione attuatore schermo mobile (SU-GIU)
TX9	Programmazione forma Multi-Leaf
TX10	Set point temperatura struttura accelerante

Tabella 1 - Specifiche funzionali - Segnali di comando dalla CGM alla macchina

### Segnali di feedback dalla macchina alla CGM

N* segnale	Descrizione
RX1	Tensione alla linea formatrice
RX2	Tensione di picco al magnetron
RX3	Corrente di magnetron
RX4	Tensione al catodo magnetron
RX5	Corrente al catodo magnetron
RX6	Corrente di elettromagnete
RX7	Potenza trasmessa in guida
RX8	Potenza riflessa in guida
RX9	Tensione di picco al cannone elettronico
RX10	Corrente alla pompa ionica
RX11	Dose alle camere di ionizzazione IC1 e IC2
RX12	Temperatura della struttura accelerante

Tabella 2 Specifiche funzionali - Segnali di feedback dalla macchina alla CGM

Tabella A2 Specifiche dei segnali

SPECIFICHE SEGNALI CGM_1						
N° segnale	Descrizione	Tipo segnale_Re.1	Range_Re.1	Tipo segnale_Re.2	Range_Re.2	Tryg.
TX0	Segnale di ON-OFF	Switch		Digitale	TTL	
TX1	Accensione HVPS	Digitale	TTL	Digitale	TTL	
TX2	Impulso al thyatron	Digitale	TTL	Digitale	TTL	X
TX3	Regolazione corrente di elettromagnete	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	
TX4	Tensione di picco al cannone elettronico	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	
TX5	Impulso al cannone elettronico	Digitale	TTL	Digitale	TTL	X
TX6	Programmazione posizione angolare acceleratore			Digitale	RS-485	
TX7	Programmazione UM per angolo di irraggiamento			Digitale	RS-485	
TX8	Attivazione attuatore schermo mobile (SU-GIU)			Digitale	RS-485	
TX9	Programmazione forma Multi-Leaf			Digitale	RS-485	
TX10	Set point temperatura struttura accelerante			Digitale	RS-485	
TX11	Syncro	Digitale	TTL	Digitale	TTL	X
RX1	Tensione alla linea formatrice	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	
RX2	Tensione di picco al magnetron	Analogico	0-10 V	Digitale	RS-485	X
RX3	Corrente di magnetron	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	X
RX4	Tensione al catodo magnetron	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	X
RX5	Corrente al catodo magnetron	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	
RX6	Corrente di elettromagnete	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	
RX7	Potenza trasmessa in guida	Analogico	0-1 V	Digitale	RS-485	X
RX8	Potenza riflessa in guida	Analogico	0-1 V	Digitale	RS-485	X
RX9	Tensione di picco al cannone elettronico	Analogico	0-10 V	Analogico	0-10 V	X
RX10	Corrente alla pompa ionica	Analogico	0-10 V	Digitale	RS-485	
RX11	Dose alle camere di ionizzazione IC1 e IC2	Digitale	RS-485	Digitale	RS-485	X
RX12	Temperatura della struttura accelerante	Analogico	0-10 V	Digitale	RS-485	
RX1	Tensione alla linea formatrice			Digitale	RS-485	
RX2	Tensione di picco al magnetron			Digitale	RS-485	
RX3	Corrente di magnetron			Digitale	RS-485	
RX4	Tensione al catodo magnetron			Digitale	RS-485	
RX5	Corrente al catodo magnetron			Digitale	RS-485	

Tabella 3 Specifiche dei segnali CGM\_1

Nella tabella A2 le colonne denominate Re1 si riferiscono al funzionamento dell'armadio di controllo come viene strutturato nelle macchine IORT, mentre le colonne denominate Re2 si riferiscono ad un possibile update del sistema per ottimizzarne il funzionamento per l'applicazione al linac mammella-prona.

## **APPENDICE B. Specifiche tecniche del modulatore del magnetron**

### **Annex A – Terms**

Request for Quotation (RFQ) – Procurement of one solid-state modulators for one E2V pulsed magnetron radiofrequency source.

#### **A.1 - Background**

The Particle Accelerators and Medical Applications Laboratory of ENEA (within the Physics Technologies division of Fusion and Nuclear Security Department), is involved in the development of an innovative medical radiotherapy machine for the treatment of the breast cancer. In this machine the patient lays in prone position over a specially designed table that has a “hole” where the breast is introduced for irradiation. The photon beam is delivered to the irradiation parallel to the human body, reducing the dose delivered to the torso where sensitive organ like lungs and heart are located. The linac, with the RF source is mounted over a rotating platform with the breast in the rotation axis position. In this setup it is possible to irradiate the breast at different angles by rotating. The electron linac uses a 2MW peak output power magnetron to accelerate the electron. The selected model is the MG5125, manufactured by E2V Technologies. This magnetron model is used in machines for radiotherapy applications.

The magnetron needs a modulator for biasing and operation. Due to the experimental nature of the project and the particular application, the modulator is required to meet stringent specification in terms of stability, reliability and maintainability that need particular care in its design and features not found in similar units for different applications.

#### **A.2 - Work to be performed**

The vendor shall provide ENEA (FSN-TECFIS-APAM) with 1 (one) state-of-the-art solid-state modulator unit for the pulsed magnetron model MG5125, according to the technical specification in Annex B to this document.

#### **A.3 - List of abbreviations**

- e.m. Electromagnetic

- HVPS High Voltage Power Supply
- LC Inductor Capacitor
- LLRF Low Level Radio Frequency
- PFN Pulse Forming Network
- PLC Programmable Logic Controller
- RF Radio frequency
- TBC To Be Confirmed
- TBD To Be Defined

## **Annex B – Technical Specification for the design, construction and test of a high voltage Solid State Pulsed Modulator for the PMP project**

This annex describes the main technical specification for the MG5125 pulsed magnetron modulator. The functions and structure of the modulator, and the definition of the essential parameters, are specified in this document.

### **B.1 – ENEA 400 V mains line network specification**

The ENEA C.R. Frascati 400V – 50 Hz network will be used to power the modulator. The main characteristics of the line are reported in Table 2 below.

**Table 2 - 400 V mains line network specification**

Specification	Parameter	Value
B1.1	Neutral connection	Neutral with one-point directly connected to ground
TB1.2	Variation of the mains (fast)	± 1.5%
B1.3	Variation of the mains (slow)	± 5%
B1.4	Variation of the mains (frequency)	± 2%
B1.5	Grounding	Distributed ground circuit

Tabella 4 - Table 2 - 400 V mains line network specification

This distribution system complies with the Italian rules CEI 64-8 (HD384, IEC 364) for TN-S distribution systems (TBC).

## **B.2 – Modulator Configuration**

The modulator, subject of the herewith technical specification, may consist of the following sections:

### **B2.1 – Power Section**

The power section is composed of:

1. an inverter-type switched mode HV power supply to charge the switch unit,
2. measuring and monitoring equipment of the output voltage and current,
3. protection system of the HVPS.

### **B2.2 – Switching section**

The switching section consists of:

1. Solid state pulse generator,
2. Energy Storage capacitor bank,
3. Switching unit control and measure system,
4. Switching circuit cooling system.

### **B2.3 – Magnetron oil Tank**

The magnetron oil tank assembly consists of:

1. Pulse transformer,
2. Load HV interface,
3. Magnetron heater transformer,
4. Insulating Oil level and temperature measuring system,
5. Oil tank water cooling system (if required),
6. Voltage and Current monitors.

### **B2.4 – Series of Power Supplies**

Power supplies included into the unit:

1. Magnetron heater power supply.

### **B2.5 – Low Power Section**

The low power section generates the trigger and synchronization signals for the modulator.

### B.3 – Modulator Functions

The modulator, subject of the herewith technical specification, shall provide, at least the following functions:

1. (B3.1) Provide a mechanical framework for the installation of the modulator into a 19” rack.
2. (B3.2) Generate the high voltage pulse to the MG5125 magnetron tube
3. (B3.3) Provide the heater bias current
4. (B3.4) Provide system cooling
5. (B3.5) Provide control and diagnostic information to higher level control system
6. (B3.6) Provide hardware interlock for integration into machine and building safety system

The modulator shall comply to international and Italian standards concerning electrical machines used in industrial environments (see section B.6).

#### B3.1 – Mechanical framework

The modulator dimensions and weight must not exceed the values reported in Table 4 below as they are key requirements for machine design. Modulator will be installed in a standard 19” rack on a rotating platform where space and weight constraints are stringent. Requirements are reported in Table 3.

*The modulator shall be integrated in a single enclosure hosting the whole system or in split enclosures (maximum 2).*

**Table 3 – Mechanical framework specification**

Specification	Parameter	Units	Min	Max	Notes
B3.1.1	Mod. Width	mm		410	See note 1
B3.1.2	Mod. Length	mm		540	See note 1
B3.1.3	Mod. Height	mm		500	See note 2
B3.1.4	Mod. Weight	kg		150	See note 2,3

Tabella 5 - Table 3 – Mechanical framework specification

**Note 1:** In case of split enclosures, this is the maximum value for each enclosure.

**Note 2:** In case of split enclosures, this is the sum of the values of both enclosures.

**Note 3:** This value does not consider oil weight.

*A solution that envisage the installation of the modulator into standard 19-inches rack (as defined in IEC 60297) will be appreciated by ENEA.*

#### B3.2 – Pulse generator

The modulator shall provide a high voltage pulse (negative to ground) according to the specification reported in Table 4, for the magnetron MG5125 whose typical and measured operating parameters are reported in Annex D (reference D.1). Refer to B.7 for pulse shape definitions.



In particular, the following parameters should be adjustable (within the specified range) from the included control system (B3.6) and from a higher level control system:

1. Operational voltage range (30 – 47 kV) with setting resolution of  $\pm 0.01\%$
2. Pulse length (top) (0.5 - 5  $\mu\text{s}$ ) (see note 3)
3. Pulse repetition frequency (0 - 200 Hz)

**Table 4 – Magnetron pulse shape specification**

Specification	Parameter	Units	Min	Max	Notes
B3.2.1	Output Voltage	kV	30	47	
B3.2.2	Output Current	A	60	100	
B3.2.3	Pulse Length (top)	$\mu\text{s}$	1	5	See figure 1
B3.2.4	Pulse Repetition Frequency (PRF)	Hz	1	200	
B3.2.5	Pulse top flatness	%	+	$\pm 2$	
B3.2.6	Pulse Rate of Rise	kV/ $\mu\text{s}$	80	120	See figure 1
B3.2.7	Pulse Voltage amplitude stability	%	-	$\pm 2$	
B3.2.8	Delay from trigger (trig delay)	$\mu\text{s}$	-	1.5	See figure 1
B3.2.9	Pulse-to-Pulse Jitter (time)	ns	-	$\pm 5$	
B3.2.10	Pulse to pulse Width Variation (time)	ns	-	$\pm 10$	
B3.2.11	Polarity	Negative to ground			

Tabella 6 - Table 4 – Magnetron pulse shape specification

### B3.3 – Heater bias

The modulator shall provide high stability DC bias for magnetron heater with according to the specification reported in Table 5.

**Table 5 – Heater bias specification**

Specification	Parameter	Units	Min	Max	Notes
B3.3.1	DC Voltage	V	-	8.5	
B3.3.2	DC Current	A	-	9	
B3.3.3	Current regulation stability	%	-	<1%	
B3.3.4	Heater current ramping	According to magnetron specification and see note 6			

Tabella 7 - Table 5 – Heater bias specification

**Note 6:** Correct power cycle of the Heater (filament) is mandatory as it affects magnetron lifetime.

The modulator must provide the possibility to ramp the bias current according to magnetron manufacturer specification. Some information is contained in Annex D, reference D.1.

The vendor shall allow the users to tune the ramping parameter, through the control system or through a procedure agreed with the vendor.

### B3.4 – System cooling

An efficient cooling system of the modulator is mandatory. Where needed, the vendor will use air cooling and or water cooling systems in the modulator cabinets.

*Moreover, the vendor will inform ENEA about the heating power emitted to air by modulator.*

### B3.5 – Control system

The modulator control system provides a remote control and diagnostic interface giving the user full control of the unit parameters. The remote interface shall provide data through an Ethernet (100Base-Tx or 1000Base-TX) connection. Modulator control system functions requirements are summarized in Table 6.

**Table 6 – Modulator control system requirements**

Specification	Function	Description
B3.5.1	Sequencing	guarantee, both locally and remotely, the correct sequence of magnetron and modulator switch-on and switch-off.
B3.5.2	Parameter setting	allow, both in local and remote mode, the correct setting of all the operating parameters of the system
B3.5.3	Parameter readout	allow the readout of all the operating parameters, both locally and remotely, with an update frequency no lower than 100 Hz.
B3.5.4	Alarm and protection	guarantee the intervention of alarm and protection systems of modulator and magnetron and their indication both locally and remotely.
B3.5.5	Trigger selection	Allow the modulator to operate on an internally generated trigger or an externally generated one (see note 7).
B3.5.6	Remote upgrade	the modulator must have a suitable system for remote upload or upgrade of the system software (e.g. from vendor site).

Tabella 8 - Table 6 – Modulator control system requirements

Note 7: The modulator shall operate on an internally generated trigger or on an externally generated trigger signal provided by the higher level control system.

It is requested that source code files and communication protocol of the PLC software are provided to ENEA.

The diagnostic interface shall provide, at least, information about:

1. Bias voltage and current for heater
2. High voltage DC power supply programmed voltage
3. HV pulse voltage and current
4. Magnetron operation time (accumulated)

The minimum set of control signals that must be implemented is reported in Table 7.

**Table 7 – Minimum set of control signals provided by the modulator**

Specification	Signal	Type/Connector	Notes
B3.5.7	Electrical trigger input	TTL/CMOS	BNC connector for external trigger to modulator.
B3.5.8	Ethernet interface	100Base-Tx or 1000Base-Tx	Ethernet interface for remote connection to control and diagnostic interface.
B3.5.9	Tube pulse current	BNC	Analog signal proportional to the instantaneous current of the magnetron.
B3.5.10	Tube pulse voltage	BNC	Analog signal proportional to the instantaneous voltage of the magnetron.

Tabella 9 - Table 7 – Minimum set of control signals provided by the modulator

The modulator shall be able to run on a self-generated trigger or on an externally generated one.

### **B3.6 – Hardware interlock system**

Modulator operation and, in particular, high voltage generation should be enabled only in the presence of an interlock signal provided by installation site. The modulator unit should provide a user-accessible connector for the interlock function.

*The vendor, shall provide points of intervention on the modulator, isolated and normally closed, which will be used by ENEA, to inhibit the operation in case of external alarms and protections (B3.5.4)*

## B.4 – Construction and Assembly of the Pulsed Modulator

**Table 8 – Minimum set of control signals provided by the modulator**

Specification	Parameter	Description
B4.1.1	Interference	The electromagnetic compatibility (EMC) of the modulator shall be designed with great care in order to reduce, as much as possible, the interferences with other systems of the accelerator and, mainly, the LLRF systems.
B4.1.2	Cabling	Wherever necessary, twisted cables, coaxial cables and, e.m. shields shall be used.
B4.1.3	Electromagnetic Shielding	To reduce as much as possible the e.m. interferences, panels and doors locking systems shall be designed with great care.
B4.1.4	Mains filtering	The vendor shall apply filtering devices at the connection point with the main-line.
B4.1.5	Identification	All cables, wires and components shall be identified and numbered.
B4.1.6	Maintenance easiness and safety	Particular attention shall be given to all aspects concerning equipment operation, maintenance (that shall be as easy as possible) as well as personnel safety.
B4.1.7	Grounding	All magnetic components and mechanical subassemblies shall be grounded.
B4.1.8	Mains cable location	Input Mains cables will have access, preferably from the bottom-rear of the cabinet.
B4.1.9	Informative panel	A plate located on the front panel must be provided. The following information must be written in a legible way: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vendor's name, factory location and phone/fax/e-mail address</li> <li>• Designation or identification number of the unit</li> <li>• Nominal/maximum input voltage/current</li> <li>• Ambient Temperature Operating Limits</li> <li>• Weight and dimensions</li> <li>• Year of construction</li> <li>• Indication of Compliance with European standards on safety</li> </ul>

Tabella 10 - Table 8 – Minimum set of control signals provided by the modulator

## B.5 – Documentation

**Table 9 – Documentation that shall be provided with the offer**

Specification	Document	Description
B5.1.1	Electrical diagram	Electrical of the power circuits and block diagrams of the low level electronics
B5.1.2	Preliminary layout drawings	Preliminary construction layout drawing showing the location of main components and giving their dimensions and weight
B5.1.3	Components description	A list of main components illustrating their characteristics and ratings
B5.1.4	Thermal losses	Evaluation of the thermal losses in the air
B5.1.5	Reactive power and harmonics	Evaluation of reactive power as well as a.c. current harmonics at nominal current

Tabella 11 - Table 9 – Documentation that shall be provided with the offer



**Table 10 – Documentation that shall be provided with the modulator**

Specification	Document	Description
B5.2.1	Mechanical drawings	Full set of mechanical drawings of cabinets and subassemblies
B5.2.2	Power electronics of power parts	Principle and detailed circuit diagrams of power parts and electronics
B5.2.3	Power supplies documentation	Complete electrical schemes of power supplies mentioned in B2.4
B5.2.4	Cabling diagrams	Detailed cabling and interconnection diagrams
B5.2.5		Drawings of cable terminal boards
B5.2.6	User manual for operation and maintenance	User manual describing the principle of regulation as well as operational adjustment procedures
B5.2.7	User manual of the control interface and communication protocol	User manual of the control interface and specification of the control/readout protocol (see B3.5).
B5.2.8	Components documentation	List of main components of the modulator components, including data sheets and test certificates where applicable.
B5.2.9	Updated drawings	The drawings and diagrams shall be updated to the “as built” operating configuration of the modulator

Tabella 12 - Table 10 – Documentation that shall be provided with the modulator

## B.6 – Applicable standards

**Table 11 – CE marking**

Specification	Description
B6.1.1	The modulator system shall be clearly marked “CE”

Tabella 13 - Table 11 – CE marking

**Table 12 – Compliance**

Specification	Description
B6.2.1	In general, the modulator must comply with the European rules (IEC) and, in particular, with Italian safety regulations

Tabella 14 - Table 12 – Compliance

## B.7 Pulse shape definitions

The magnetron pulse section describes the requirements of the generated pulse with the definitions of terms.

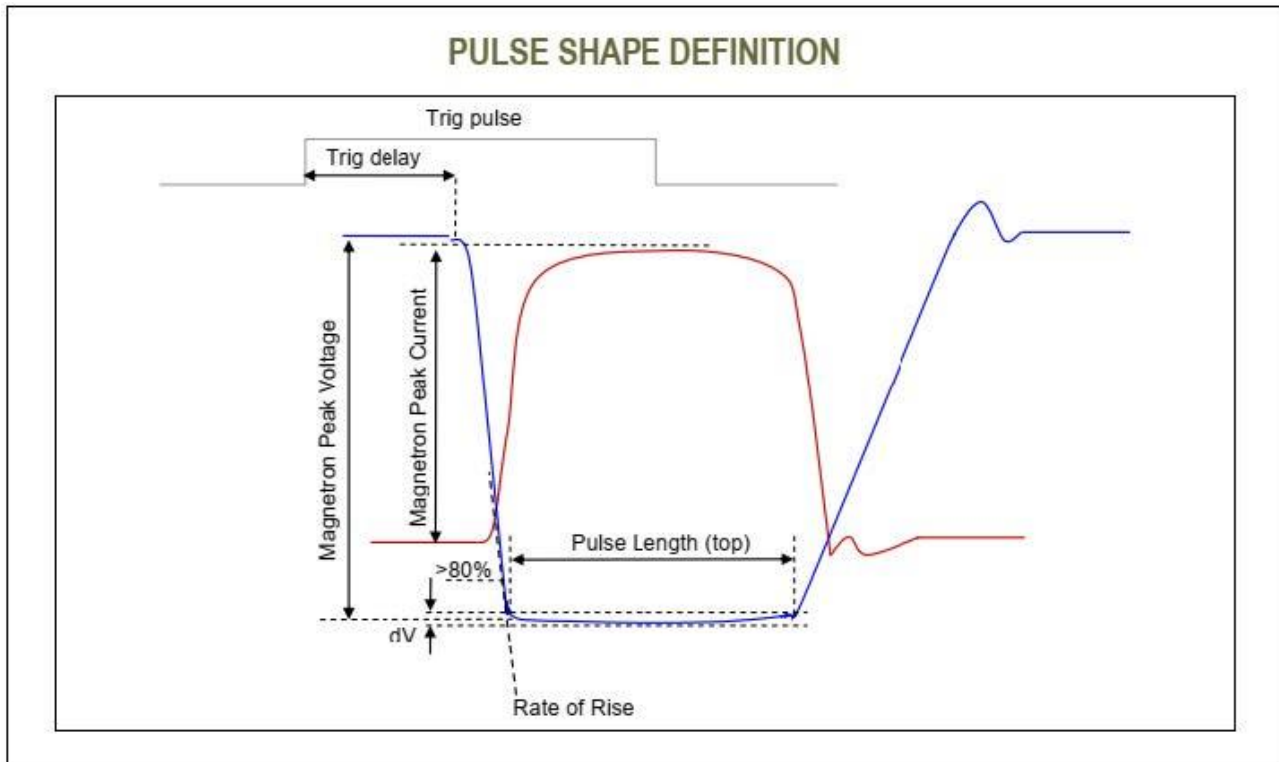


Figura 6. Figure 1 - Magnetron pulse shape definitions

Figure 1 shows the definition of the essential parameters that the modulator unit should provide to the MG5125 magnetron tube. The trigger signal (“trig pulse in figure 1) is generated by an external timing and synchronization system. The blue curve corresponds to the voltage pulse applied to the magnetron and the red one the corresponding current pulse. The definition of the parameters follows:

- **Trig-delay:** time delay between the rising edge of the trig pulse (50% of its final voltage) and the start of the voltage pulse of the modulator.
- **Rate of rise:** pulse rising rate (in kV/us). The rising rate is computed using the slope of the voltage curve at the 80% of final voltage.
- **dV (Top Flatness):** maximum allowed voltage variation during “pulse length (top)” of voltage pulse.
- **Pulse length (top):** temporal length of the voltage pulse flat top portion.

## **Annex D – Reference documentation**

The documentation contained has been provided by the manufacturers of the magnetron tube.

### **Magnetron tube:**

D.1 – E2V, MG5125 Tunable S-Band Magnetron, A1A-MG5125 Issue 6, July 2006