

## Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

# Desenvolupament de la GUI d'un RTM de 12 MeV

**MEMÒRIA**

**21 de juny de 2021**

Autora: Ainna Li Avilés Mendieta  
Director: Youri Koubychine  
Convocatòria: Juny 2021



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

El treball consisteix en el desenvolupament i implementació d'un mòdul programat en entorn LabVIEW, a la interfície gràfica d'usuari (GUI) d'un accelerador d'electrons de 12 MeV de tipus *race-track microtron* (RTM) que s'està construint a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la UPC.

L'objectiu d'aquest mòdul és el d'afegir a la consola d'operador la funcionalitat de controlar el canvi entre els tres possibles estats del microtró: *Warming up*, *Standby* i *Ready*, tot comprovant que es compleixen certes condicions, alhora que es realitzen diferents accions com ara el bloqueig d'algunes funcionalitats o l'enviament de comandes als microcontroladors dels diferents sistemes de l'accelerador.

En el marc del projecte del microtró, està previst que el mòdul de canvi d'estat s'implementi al programa principal del GUI ja existent. En aquest treball també es presenten proves del seu funcionament i comunicació.



## Índex

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. PREFACI</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1. Origen del projecte.....  | 7         |
| 1.2. Requeriments previs .....   | 7         |
| <b>2. GLOSSARI</b>   | <b>9</b>  |
| <b>3. INTRODUCCIÓ</b>  | <b>11</b> |
| <b>4. SISTEMES DEL MICROTRÓ CONTROLATS</b>                                 | <b>15</b> |
| 4.1. Sistema de RF .....   | 15        |
| 4.2. Sistema de refrigeració .....   | 16        |
| 4.3. Sistema de buit .....   | 16        |
| 4.4. Sistema d'extracció del feix.....                                     | 17        |
| <b>5. SISTEMA DE SEGURETAT DEL LABORATORI D'ACCELERADORS DE PARTÍCULES</b> | <b>18</b> |
| 5.1. Elements de seguretat .....   | 19        |
| 5.2. Seqüències d'entrada i sortida .....                                  | 22        |
| <b>6. INTERLOCKS</b>   | <b>23</b> |
| <b>7. SISTEMA DE CONTROL DEL MICROTRÓ</b>                                  | <b>25</b> |
| 7.1. Estructura del sistema de control .....                               | 25        |
| 7.2. Protocol de comunicació .....   | 26        |
| <b>8. LABVIEW</b>  | <b>30</b> |
| 8.1. Introducció a LabVIEW .....   | 30        |
| 8.2. Elements i estructures de LabVIEW.....                                | 30        |
| 8.3. Programa principal i subrutines.....                                  | 31        |
| <b>9. MODES D'OPERACIÓ DEL MICROTRÓ</b>                                    | <b>32</b> |
| 9.1. Estats de l'RTM.....  | 32        |
| 9.2. Accions permeses en cada estat .....                                  | 33        |
| 9.3. Condicions d'estat del microtró .....                                 | 34        |
| <b>10. LÒGICA DEL MÒDUL DE CANVI D'ESTAT</b>                               | <b>37</b> |
| 10.1. Reinterpretació de les condicions.....                               | 37        |
| 10.2. Esquema i taula resum .....  | 38        |
| <b>11. DESENVOLUPAMENT DEL MÒDUL DE CANVI D'ESTAT</b>                      | <b>40</b> |
| 11.1. Panell frontal .....   | 41        |
| 11.2. Estructura del diagrama de blocs.....                                | 43        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>12. PROVES DE FUNCIONAMENT I COMUNICACIÓ</b> | <b>45</b> |
| 12.1. Muntatge experimental.....                | 45        |
| 12.2. Comunicació .....                         | 47        |
| 12.3. Resultats obtinguts.....                  | 48        |
| <b>13. ESTUDI ECONÒMIC</b>                      | <b>49</b> |
| <b>14. IMPACTE AMBIENTAL</b>                    | <b>51</b> |
| <b>15. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE</b>            | <b>52</b> |
| <b>CONCLUSIONS</b>                              | <b>54</b> |
| <b>AGRAÏMENTS</b>                               | <b>56</b> |
| <b>REFERÈNCIES</b>                              | <b>57</b> |

# 1. Prefaci

## 1.1. Origen del projecte

L'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en col·laboració amb l'Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics de la Lomonosov Moscow State University, porta treballant des de fa més de deu anys en la construcció d'un *race-track microtron* o RTM capaç d'accelerar electrons fins a 12 MeV amb la intenció d'utilitzar-lo en aplicacions d'irradiació de materials, radioteràpia, radiografia industrial o inspecció de mercaderies.

La programació de la consola d'operador amb la interfície gràfica d'usuari està començada i incorpora la majoria de funcionalitats, però en ser un projecte en desenvolupament, els requeriments del programa van canviant i per tant s'han d'anar afegint funcionalitats noves.

Una d'aquestes funcionalitats és la de controlar el canvi d'estat del microtró, que no està implementada al programa principal. És per això que neix aquest projecte, amb la intenció de col·laborar en el desenvolupament d'aquest accelerador programant el mòdul que controli aquest canvi.

## 1.2. Requeriments previs

La realització d'aquest projecte requereix nocions en física d'acceleradors, coneixements de l'entorn de programació LabVIEW, documentació sobre el projecte de l'RTM de 12 MeV a nivell general (de quins sistemes consta, com es controlen, com es comuniquen, etc.) però també més concretament sobre la versió actual de LabVIEW de la consola d'operador (entendre quina funció realitza cada part del programa).





## 2. Glossari

**GUI** – *Graphical User Interface*

**RTM** – *Race-track Microtron*

**UPC** – Universitat Politècnica de Catalunya

**INTE** – Institut de Tècniques Energètiques

**Linac** – *Linear Accelerator*

**keV** - Kiloelectronvolt

**MeV** – Megaelectronvolt

**Hz** – Hertz

**µs** – microsegons

**ms** – mil·lisegons

**RF** – Radiofreqüència

**SF<sub>6</sub>** – hexafluorur de sofre

**TCP/IP** - Protocol de control de transmissió/Protocol d'Internet

**HV** – *High Voltage*

**PC** – *Personal Computer*

**PLC** – *Programmable Logic Controller*

**ASCII** – *American Standard Code for Information Interchange*

**DBL** – *Double-precision number constant*

**TF** – *True/False*

**MCs** – Microcontroladors

**CC** – Corrent continu

**CA** – Corrent altern

**CMD** – *Command Prompt*



### 3. Introducció

Un *race-track microtron* (RTM) és un tipus d'accelerador de partícules (típicament electrons) que va sorgir a finals del segle XX com una millora del microtró clàssic circular [1] ja que permet arribar a energies superiors amb mides relativament semblants.

Aquest tipus d'acceleradors compten amb dos imants dipolars, permanents o electroimants, en forma de mitja lluna en els que es forma un camp magnètic constant, que fa que en entrar-hi partícules amb càrrega, aquestes descriuïn una trajectòria circular (s'anomenen imants corbadors). Els dos imants són separats per un espai de deriva entre ells, en el que es col·loca una estructura d'acceleració (a vegades s'anomena linac) que utilitza una ona electromagnètica d'alta energia (en concret del rang de radiofreqüència o RF) per accelerar les partícules emeses per una font, que pot ser per exemple un filament metàl·lic, i que són injectades a l'accelerador per mitjà d'un canó d'electrons (en anglès, *electron gun*). Com que el feix d'electrons es recircula [2], el gir que es fa en els imants corbadors es realitza a un radi diferent a cada volta. Un cop s'ha assolit l'energia desitjada, el feix es pot extreure utilitzant imants. En alguns RTMs, aquesta extracció del feix es pot realitzar en qualsevol de les òrbites, el que permet molta versatilitat (es poden obtenir feixos a diferents energies).

L'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en col·laboració amb Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics de Lomonosov Moscow State University [3], porta treballant des de fa més de deu anys en la construcció d'un RTM capaç d'accelerar electrons fins a 12 MeV [4] amb la intenció d'utilitzar-lo en aplicacions d'irradiació de materials, radioteràpia, radiografia industrial, o inspecció de mercaderies [5].

L'estructura del capçal (la part principal de l'RTM de 12 MeV) es mostra a la figura 1.

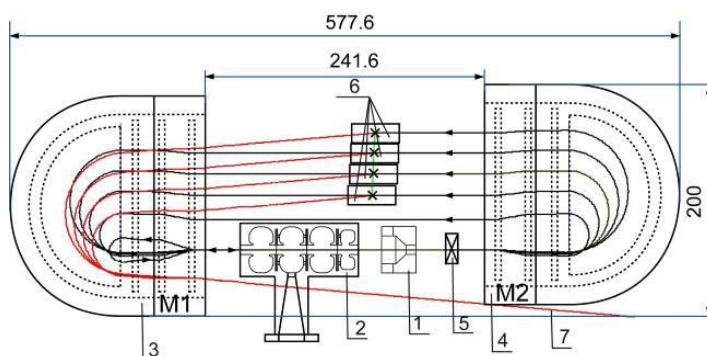


Figura 1: Esquema del capçal del microtró [5]. Mides en mm.

Les seves parts principals són el canó d'electrons (1), que té la funció de subministrar i introduir el feix d'electrons a l'estructura d'acceleració en condicions òptimes, l'estructura d'acceleració (2), que consta de quatre cavitats ressonants que proporcionen un guany per volta de 2 MeV utilitzant una ona de RF, els imants permanents corbadors (3) i (4), l'imant quadrupolar focalitzador del feix (5) i els imants d'extracció del feix (6). L'element (7) és la trajectòria de sortida del feix. Tots aquests components es troben tancats dins d'una cambra d'alt buit, tal i com es mostra a la figura 3.

L'RTM de 12 MeV de l'INTE funciona en mode polsat, el que significa que l'ona electromagnètica d'alta freqüència accelera durant períodes de l'ordre de  $3 \mu\text{s}$  amb una freqüència de repetició de polsos d'entre 1 - 200 Hz. A més, durant la seva circulació per l'accelerador els electrons s'agrupen en paquets, *bunches*, d'aproximadament  $10^{10}$  electrons (la figura 2 il·lustra aquestes tres característiques). Els paràmetres principals es troben a la taula 1.

A cada volta, els electrons del feix s'acceleren 2 MeV i les dimensions de l'accelerador permeten quatre òrbites que fan que es pugui fer l'extracció del feix a 6, 8, 10 o 12 MeV.

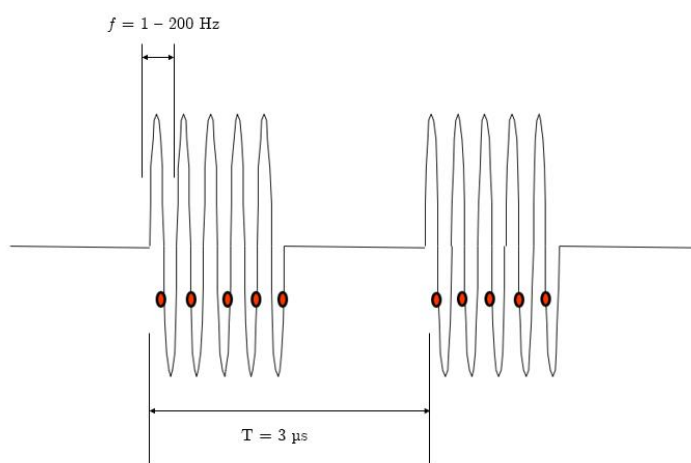


Figura 2: En color negre l'ona de radiofreqüència i en color vermell els paquets d'electrons.

| Paràmetre                           | Valor            |
|-------------------------------------|------------------|
| Energies del feix                   | 6, 8, 10, 12 MeV |
| Freqüència d'operació RF            | 5712 MHz         |
| Guany d'energia per volta           | 2 MeV            |
| Corrent de sortida del feix polsat  | 5 mA             |
| Freqüència de repetició dels polsos | 1 - 200 Hz       |
| Duració del pols                    | 3 $\mu$ s        |
| Camp magnètic dels imants           | 0,8 T            |
| Energia d'injecció                  | 25 keV           |

Taula 1: Principals paràmetres de l'RTM de 12 MeV [6].

L'acceleració dels electrons s'aconsegueix mitjançant una ona electromagnètica de RF. La generació i el transport d'aquesta ona fins les cavitats de l'estructura d'acceleració es porta a terme pel sistema de RF (veure figura 3) que consta de:

1. Modulador: produeix polsos d'alt voltatge i els subministra al magnetró.
2. Magnetró: genera l'ona de RF durant els polsos del modulador.
3. Guia d'ona flexible: condueix l'ona de RF fins al circulador.
4. Circulador: protegeix el magnetró fixant el sentit de recorregut de l'ona i evitant que l'ona reflectida torni al magnetró.
5. H-bend amb detector d'arcs elèctrics: és una guia d'ona corbada que incorpora un detector d'arcs elèctrics (per protegir el circulador i la finestra de buit). La guia és de secció rectangular i la lletra H indica que es corba pel costat estret de la secció.
6. Acoblador dual: un element que permet extreure una part de l'ona electromagnètica amb l'objectiu de controlar el funcionament del sistema de RF.
7. Junta rotatòria: permet la rotació del capçal del microtró respecte la part estàtica del sistema de RF (el magnetró i el circulador).

8. Finestra de buit: una placa de beril·li amb brida que separa la guia d'ona i la zona d'alt buit dins del capçal mentre deixa passar l'ona electromagnètica.
9. Guia d'ona rígida: condueix l'ona des de la finestra de buit fins a l'estructura d'acceleració
10. Capçal del microtró: veure figura 1.
11. Bomba iònica: crea i manté un alt buit dins el capçal

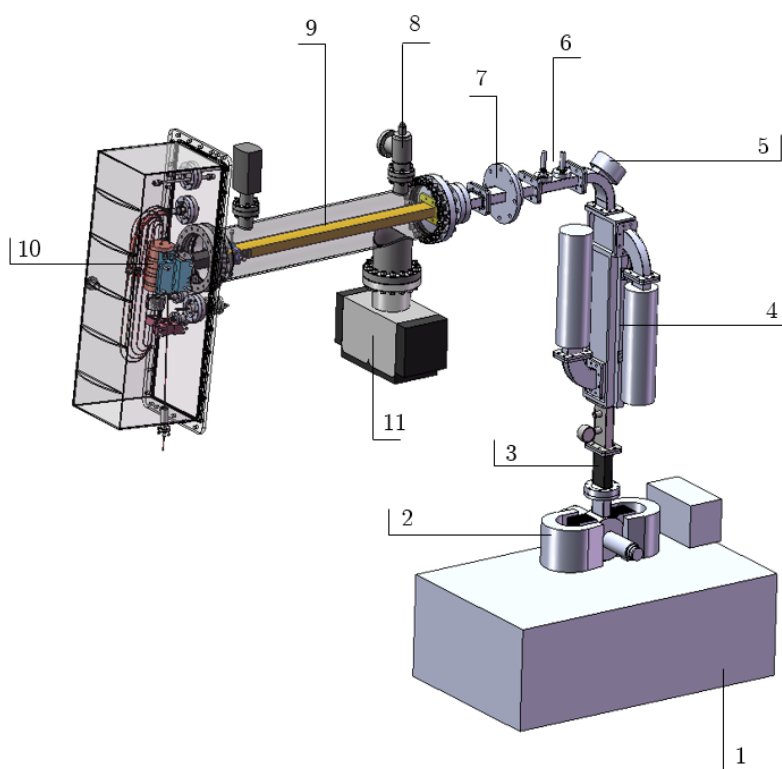


Figura 3: Esquema de l'estructura del sistema de RF.

El treball realitzat que es presenta a continuació consisteix en el desenvolupament i implementació d'un nou mòdul de la consola d'operador amb la interfície gràfica d'usuari (GUI) programat en entorn LabVIEW [7] (un llenguatge de programació gràfica, veure secció 8 per a més detalls).

L'objectiu principal del mòdul és el d'afegir a la consola d'operador la funcionalitat de controlar el canvi entre els tres possibles estats del microtró: *Warming up*, *Standby* i *Ready*,

tot comprovant que es compleixen certes condicions, alhora que es realitzen diferents accions com ara el bloqueig d'algunes funcionalitats o l'enviament de comandes als microcontroladors dels diferents sistemes de l'accelerador.

## 4. Sistemes del microtró controlats

Pel desenvolupament del mòdul és vital conèixer cadascun dels elements de l'RTM, la seva funció, localització, i forma de comunicació amb el sistema de control [6]. Aquest coneixement és important no només per tal d'utilitzar algunes d'aquestes variables de control en el programa, sinó també per tenir una millor comprensió del programa original, per tal de programar-lo tenint en compte com s'hi haurà d'acoblar.

A continuació es detallen els sistemes principals que permeten la correcta operació de l'accelerador i són controlables/visualitzables per l'operador des de la consola.

### 4.1. Sistema de RF

Es tracta del sistema de generació i transport de l'ona electromagnètica de RF que accelera els electrons en les cavitats de l'estructura d'acceleració. Les seves parts principals són les següents:

- Magnetró: Converteix l'energia elèctrica en energia electromagnètica en forma d'ona de RF amb una freqüència de 5712 MHz.
- Modulador: La funció d'aquest element és la generació de polsos de 3  $\mu$ s de durada d'alt voltatge de 36 kV que alimenten el magnetró.
- Detector d'arc: Té la funció de detectar arcs elèctrics dins la guia d'ona amb l'objectiu de protegir el circulador i la finestra de buit.
- Sistema de gas aïllant: Per evitar les descàrregues dielèctriques dins de la guia d'ona, aquesta s'omple d'hexafluorur de sofre, SF<sub>6</sub>. El sistema inclou una sèrie de vàlvules, una bomba i un sensor per tal de mantenir la pressió nominal del gas (~1,8 bar).

D'aquest sistema, un relé al detector d'arc genera senyal d'interlock quan es produeixen més d'un cert nombre d'espurnes o descàrregues

dielèctriques. Un altre relé genera senyal d'interlock si la pressió del gas SF<sub>6</sub> dins la guia d'ona cau per sota la pressió nominal.

#### 4.2. Sistema de refrigeració

El sistema de refrigeració s'encarrega de dissipar la calor produïda durant el funcionament de l'RTM mitjançant la circulació d'aigua destil·lada a temperatura estable, i el magnetró mitjançant aire. La figura 4 il·lustra les parts i el funcionament d'aquest sistema.

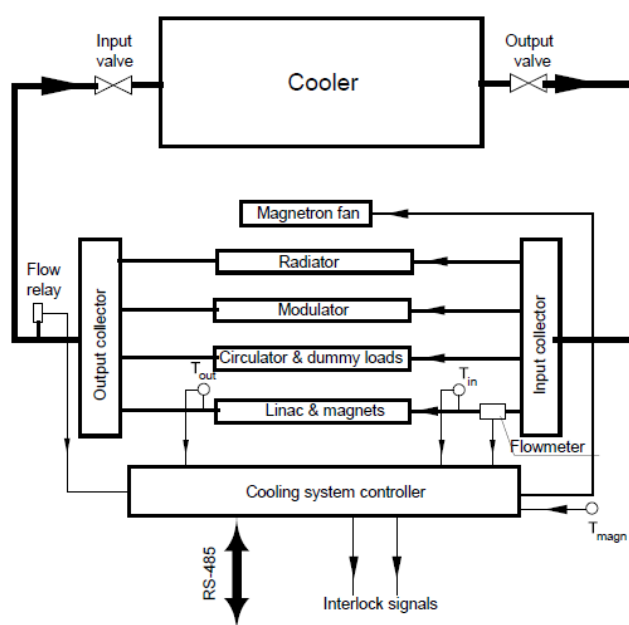


Figura 4: Esquema del sistema de refrigeració.

Es monitoritzen les temperatures de l'aigua d'entrada i sortida del linac  $T_{in}$  i  $T_{out}$ , la temperatura del magnetró  $T_{magn}$ , i el cabal de l'aigua als tubs de refrigeració al linac (amb el cabalímetre). A més, un relé al col·lector de sortida genera senyal d'interlock quan el cabal està per sota de 4 lpm.

#### 4.3. Sistema de buit

El sistema de buit de l'RTM permet crear i mantenir el buit a la cambra de buit del capçal del microtró i proporcionar-ne el control del seu nivell. El sistema consta d'una bomba



turbomolecular que fa un primer buit fins a  $10^{-2}$  Pa (aquesta no forma part del sistema de control de l'RTM i es monitoritza per separat), i d'una bomba iònica que crea i manté un buit de  $10^{-4}$  Pa.

Les variables d'aquest sistema que es controlen són:

- Estat de funcionament de la bomba iònica (si hi ha *High Voltage* (HV) d'alimentació)
- Corrent de la bomba iònica
- Pressió a la cambra de buit.

A més, el sistema genera un senyal d'interlock si la bomba està en funcionament (HV on) i si hi ha un mal buit perquè la pressió ha pujat per damunt d'un llindar ( $3 \cdot 10^{-6}$  mbar).

#### 4.4. Sistema d'extracció del feix

Per tal d'utilitzar el feix en alguna de les aplicacions mencionades a la secció 3, cal extreure el feix d'una de les òrbites del microtró. Per a fer-ho, s'utilitzen quatre imants dipolars d'extracció (un per a cada òrbita, veure figura 5). Aquests imants es posicionen desplaçant la seva estructura de suport mitjançant un motor pas a pas. Les variables a controlar en el sistema són la posició dels imants mesurada amb un potenciòmetre lineal i dos interruptors de fi de carrera de l'estructura.

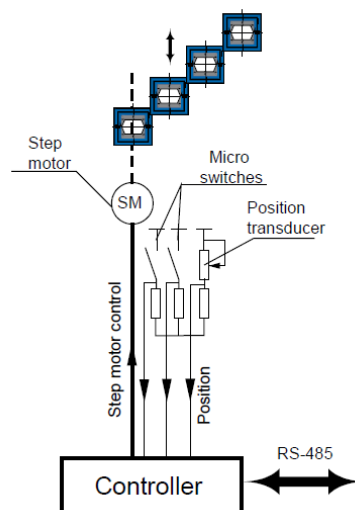
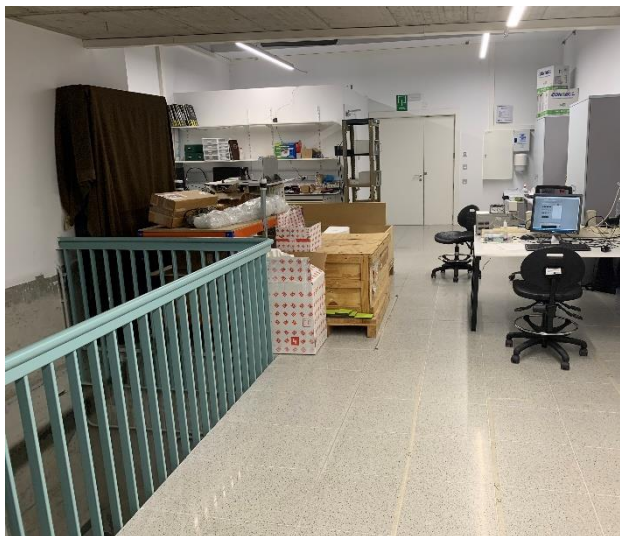


Figura 5: Esquema del sistema d'extracció del feix. En color blau, els quatre imants dipolars d'extracció.

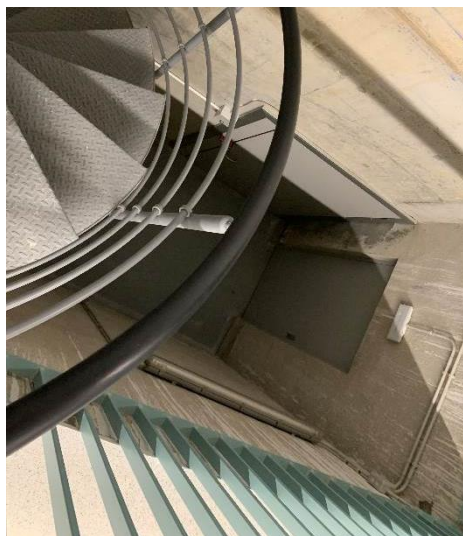
## 5. Sistema de seguretat del Laboratori d'Acceleradors de Partícules

L'RTM es troba situat en un búnquer subterrani blindat [8] amb parets de formigó baritat d'un metre de gruix, per tal de protegir l'entorn de la radiació produïda durant el funcionament de l'accelerador. Al búnquer s'hi accedeix per unes escales (veure figura 6b) des d'un espai de la planta superior on es troba la consola d'operador i un taller. Aquests dos espais formen el Laboratori d'Acceleradors de Partícules de l'INTE, al Campus Diagonal-Besòs de la UPC.

La seguretat de les persones és de vital importància en una instal·lació d'aquest tipus en què es treballa amb alta tensió i un feix de partícules molt energètic. És per això que el laboratori i el búnquer consten de diversos elements de seguretat que es connecten a un mòdul d'interlocks (veure seccions 6, 7 i 12) directa o indirectament, per tal que l'ordinador des d'on es fa el control del microtró inhabiliti i no permeti l'activació de les accions perilloses en cas que es detecti que una persona es troba dins el búnquer.



(a)



(b)

Figura 6: (a) Laboratori de l'INTE. (b) Escales de baixada al búnquer.

## 5.1. Elements de seguretat

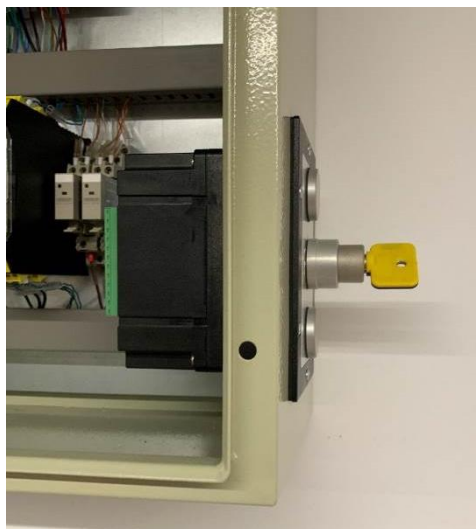
Els elements que formen part tant del sistema de seguretat com de les seqüències d'entrada i sortida al búnquer (veure apartat 5.2), són:

- Claus:

Hi ha dues claus, la primera és la clau del selector (de color groc a les figures 7a i 7b). Aquesta clau es pot posar en el quadre elèctric del laboratori que conté el PLC (figura 7a), i sota certes condicions, si es fa girar, desactiva l'interlock del PLC (E10, veure taula 2). Si s'extreu la clau del selector, s'activa l'interlock E12 (veure taula 2). La mateixa clau també es pot fer entrar al pany de la porta d'entrada al búnquer (figura 7b), que com es veurà en la secció 5.2, és una condició essencial per accedir-hi.

La segona clau és de color platejat (veure la figura 7b) i es pot col·locar tant en el pany de la porta del búnker per obrir-la, com en el pulsador (figura 9a) de l'interior del búnker (que forma part de la seqüència de sortida explicada a l'apartat 5.2).

Per tal que la seguretat funcioni tal com s'ha dissenyat, només hi pot haver una única còpia de cada clau.



(a)



(b)

Figura 7: (a) Clau del selector posada en el quadre elèctric. (b) Pany de la porta d'entrada al búnquer.

- Polsadors d'emergència

En total n'hi ha quatre, tres a l'interior del búnquer (senyalats en color vermell a la figura 8) i un molt proper a la consola de l'operador (figura 10a, la ubicació exacta encara està per determinar). Si algun dels tres polsadors d'emergència interiors és premut, s'activa tant l'interlock E11 com l'E10 del PLC, i si es prem el polsador d'emergència de l'operador (figura 10a), s'activen els interlocks E4 i E10 (veure taula 2).



Figura 8: Polsadors d'emergència (encerclats en vermell) i polsador de la seqüència de sortida (encerclat en verd).



(a)

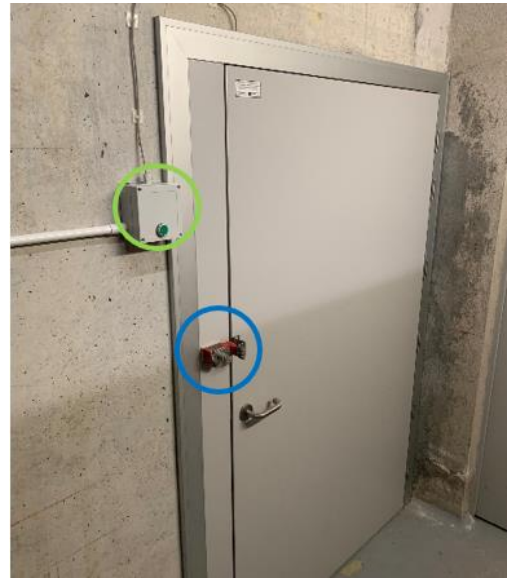


(b)

Figura 9: (a) Detall del polsador a l'interior del búnquer de la seqüència de sortida. (b) Detall d'un dels polsadors d'emergència.



(a)



(b)

Figura 10: (a) Polsador d'emergència de l'operador, proper a l'ordinador amb la consola d'operador. (b) Porta d'entrada al búnker. Encerclat en verd el polsador de seqüència de sortida i encerclat en blau el pany de la porta.

- Polsadors de les seqüències d'entrada i sortida

D'aquest tipus de polsadors n'hi ha dos, un a l'interior del búnquer que admet l'entrada de la clau platejada (figura 9a i en color verd a la figura 8) i l'altre a la part exterior de la porta (senyalat en color verd a la figura 10b). Aquests formen part de la seqüència de sortida (veure apartat 5.2) i no generen cap tipus de senyal d'interlock.

Com a mesura complementària de seguretat, està previst que en un futur, un cop acabada tota la instal·lació dels sistemes de l'RTM, s'instal·lin dosímetres que alertin de possibles fuites de radiació.

## 5.2. Seqüències d'entrada i sortida

La seguretat de l'operari és primordial en el disseny d'un accelerador, i és per això que s'ha dissenyat una seqüència d'entrada i una seqüència de sortida d'obligat compliment, que s'ha de realitzar cada vegada que es vol entrar dins el búnquer, o es vol posar en marxa el microtró després d'haver sortit del búnquer. L'objectiu d'aquestes seqüències és que els elements perillosos de l'accelerador (emissió del feix i alta tensió) mai puguin estar activats si existeix la possibilitat que una persona es trobi a l'interior del búnquer.

### Seqüència d'entrada

1. Treure la clau groga del selector (activant-se els interlocks E10 i E12)
2. Col·locar la clau estreta del selector (clau groga) al pany de la porta i fer-la girar
3. Al pany de la porta, fer girar la clau platejada
4. Obrir la porta (s'activa l'interlock E2)

### Seqüència de sortida

1. Comprovar que cap dels polsadors d'emergència està premut
2. Introduir la clau platejada al polsador verd interior i prémer.
3. Extreure la clau platejada del polsador
4. Sortir i tancar la porta
5. Prémer el polsador de la seqüència de sortida prop de la porta
6. Introduir i girar la clau platejada al pany de la porta
7. Treure la clau groga del pany de la porta i introduir-la al selector fent-la girar
8. Fer reset als interlocks (es desactiven tots els interlocks *External* i *Vacuum*)

La seqüència d'entrada està dissenyada per tal que quan una persona vol entrar al búnquer, s'activa obligatòriament algun senyal d'interlock. D'altra banda, la seqüència de sortida està dissenyada per tal que la persona que vol sortir del búnquer es vegi obligada a entrar fins al final del *hall* (per posar la clau platejada) i s'asseguri que l'espai es troba lliure (per evitar que un operador en tanqui un altre dins).

## 6. Interlocks

Tal i com s'ha introduït a la secció 5, per tal de protegir el personal que treballarà amb l'RTM i també la pròpia maquinària, el sistema de seguretat del microtró consta de relés de bloqueig o interlocks. Aquests relés estan preparats per obrir-se quan hi ha una anomalia durant el funcionament de l'accelerador, amb l'objectiu d'aturar, si cal, la generació del feix o l'alta tensió (dos dels riscos més perillosos) de manera automàtica.

Com a mesura de seguretat, aquests interlocks "s'autobloquegen", el que significa que quan un d'aquests s'activa, encara que el problema desaparegui sol, el microtró no torna a reprendre el seu funcionament automàticament, sinó que requereix que l'operador verifiqui des de la consola o directament al búnquer que el problema s'ha solucionat i rearmi els relés (faci un "reset" als interlocks).

A més, com a mesura de seguretat addicional, per a aquelles anomalies més crítiques (com ara l'obriment de la porta del búnquer o l'activació d'un dels polsadors d'emergència, ja sigui interior o exterior al búnquer), el senyal provinent d'aquests relés es fa arribar al sistema de control per duplicat (veure figura 11). D'una banda a través del PLC (*Programmable Logic Controller*) i de l'altra, directament al mòdul d'interlocks sense haver de passar per cap microcontrolador. Amb aquesta redundància, en cas de fallar alguna de les dues connexions, LabVIEW pot rebre la dada des de l'altra.

Aquestes anomalies per les quals s'instal·la un relé, estan dividides en tres tipus, que formen les tres línies d'interlocks: *External*, *Vacuum* i *Trigger*.

- La línia *External* consta de 12 relés de caire general.
- La línia *Vacuum* consta de 2 relés associats al buit del capçal d'acceleració.
- La línia *Trigger* consta de 2 relés relacionats amb la generació dels polsos pel modulador i l'emissió del feix d'electrons.

El nom de cadascun d'aquests interlocks, el motiu pel qual s'activa, la seva codificació i quin dispositiu envia el senyal al mòdul d'interlocks, es troba a la taula 2:

| Interlock                              | Motiu  | Codi | Dispositiu |
|--|--|------|------------|
| Temperatura de l'aigua de refrigeració | $T_{\text{aigua}} > 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$   | E1   | MC5        |
| Porta búnquer                          | Porta oberta   | E2   | Directe    |
| Pressió baixa del gas SF <sub>6</sub>  | $P_{\text{SF}_6} < P_{\text{min}} (1.8 \text{ bar})$                                     | E3   | MC2        |
| Polsador d'emergència exterior         | Polsador d'emergència exterior premut  | E4   | Directe    |
| Relé flux d'aire                       | Flux d'aire insuficient. El límit depèn del calibratge.                                  | E5   | MC2        |
| Temperatura del magnetró (font de RF)  | $T_{\text{RF}} > 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  | E6   | MC5        |
| Relé cabal d'aigua                     | Cabal d'aigua insuficient ( < 4 lpm)   | E7   | MC2        |
| Error sistema d'extracció              | Imants d'extracció en posició no permesa o un dels interruptors de posició final premuts | E8   | MC3        |
| Error general                          | Pèrdua de comunicació amb la consola d'operador  | E9   | MC2        |
| PLC                                    | Elements de seguretat activats i/o protocol de seguretat no completat                    | E10  | PLC        |
| Polsadors d'emergència interiors       | Un dels polsadors d'emergència a l'interior del búnquer premut.                          | E11  | Directe    |
| Selector S1                            | Clau del selector extreta  | E12  | Directe    |
| Mal buit                               | Pressió a la cambra de buit superior a $3 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$                    | V1   | MC4        |
| Bomba iònica apagada                   | La bomba iònica no es troba en mode High Voltage (HV off)                                | V2   | MC4        |
| Detector d'arcs                        | Nombre d'arcs elèctrics detectats és superior a $N_{\text{arc}}$ (màxim predeterminat)   | T1   | MC1        |
| Feix no permès                         | El microtró no es troba en estat d'emissió del feix ( <i>Ready</i> )                     | T2   | MC1        |

Taula 2: Llista d'interlocks.



## 7. Sistema de control del microtró

### 7.1. Estructura del sistema de control

La funció del sistema de control és realitzar el control total dels sistemes de l'accelerador així com assegurar una operació segura tant pels sistemes de l'RTM com per la seguretat del personal, tot oferint una interfície convenient per l'operador.

El sistema de control del microtró té una estructura modular (veure figura 11) i consta dels següents components:

- PC principal amb la GUI
- Mòduls M1, M2, M3, M4, M5 i PLC
- Sistema d'interlocks

Cadascun dels mòduls és responsable d'un sistema o grup de sistemes i porta associat un microcontrolador comunicant amb el PC principal via Ethernet per protocol TCP/IP. El PC és la consola d'operador i té incorporada la GUI programada en entorn LabVIEW (veure secció 8).

Les connexions entre els components del sistema de control es realitzen a través d'un *Ethernet Network Switch* (un pont MAC). Els microcontroladors MC1-MC4 dels mòduls M1-M4, respectivament, són de la marca comercial Arduino (model Mega), el microcontrolador MC5 és un ADAM 6015 que té la funció de llegir temperatures i l'últim microcontrolador és el PLC que controla el sistema de seguretat del búnquer de l'accelerador (veure secció 5).

Com ja s'ha mencionat a la secció 5, els sistemes més crítics connecten simultàniament amb el PLC i el mòdul d'interlocks, de manera que les dades del seu estat arriben a LabVIEW per duplicat, en cas que algun dels dos sistemes falli.

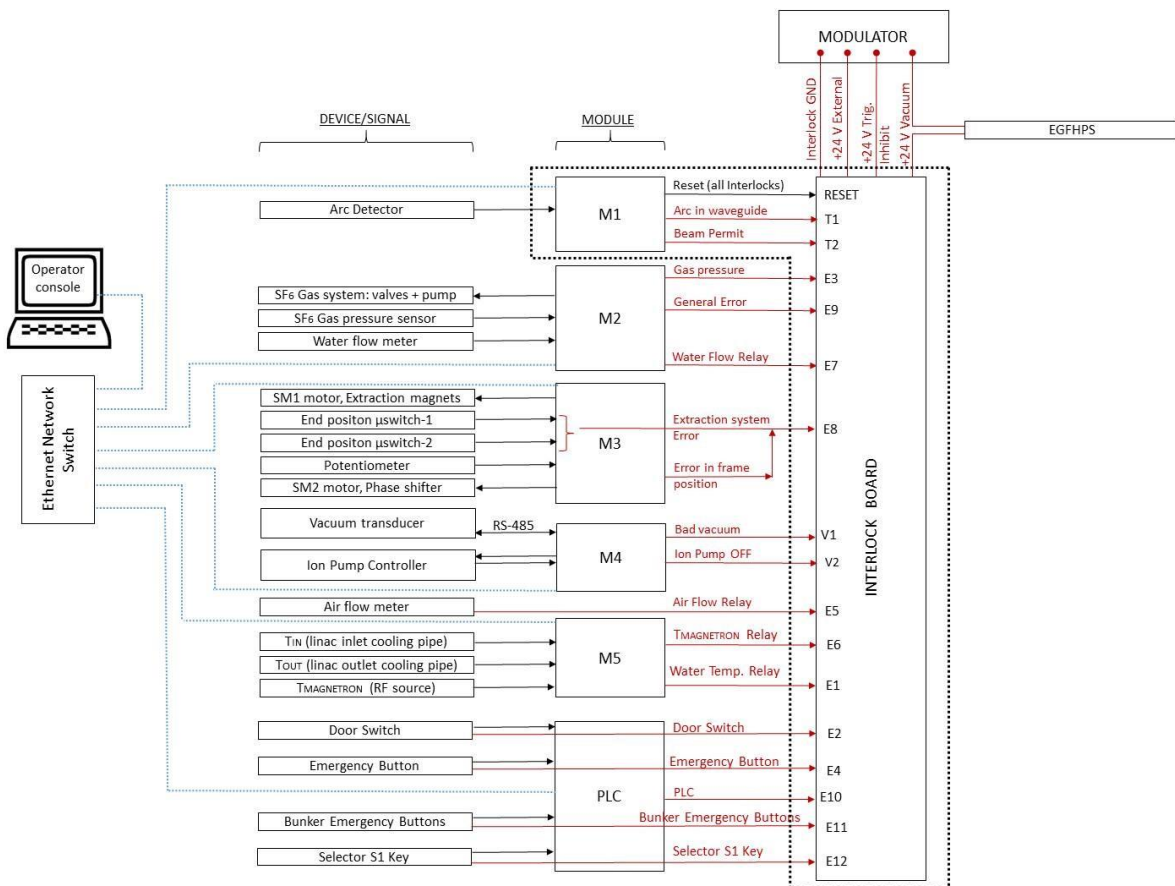


Figura 11: Arquitectura del sistema de control.

## 7.2. Protocol de comunicació

La comunicació entre els mòduls i el PC principal es fa per Ethernet i seguint el protocol TCP/IP obrint un canal a través de la plataforma LabVIEW. Aquesta comunicació entre servidor (microcontroladors) i client (LabVIEW) es fa de manera que els microcontroladors únicament responen (*reply*) quan LabVIEW fa una petició (*request*) de dades en forma d'un missatge (telegrama).

Aquest telegrama, de tipus *string*, pot ser un ping (s'envia cada certs mil·lisegons automàticament demanant un conjunt predefinit de dades, diferents per a cadascun dels cinc mòduls) o bé una comanda, la qual s'envia només si es vol modificar (*write*) o consultar (*read*) una dada puntualment.

Estructura del telegrama

|                |                     |                  |
|----------------|---------------------|------------------|
| <i>Request</i> | (Cmd/Id/Paràmetres) | Petició de dades |
| <i>Reply</i>   | (Rep/Id/Paràmetres) | Resposta OK      |
|                | (#/Id)              | Error general    |
|                | (!/Id)              | Error sintaxi    |

Taula 3: Estructura del telegrama

LabVIEW envia a cada microprocessador el *request*, i aquest respon amb un *reply*, cadascun d'ells amb l'estructura que es mostra a la taula 3. Els símbols “(“ i “)” denoten l'inici i el final del telegrama, i la barra inclinada “/” s'utilitza com a separador de paràmetres.

El primer element del telegrama (denotat com Cmd o Rep depenent de si es tracta d'un *request* o d'un *reply*) indica si el telegrama és un ping (s'escriu una P), un *write* (s'escriu una W) o un *read* (s'escriu una R). En el *request* en lletres majúscules (P,W,R) i en el *reply*, en lletres minúscules (p,w,r).

Si hi ha hagut algun problema d'interpretació del *request* per part del microcontrolador, aquest respon amb un missatge que comença amb el símbol # (ASCII 35) si no s'ha pogut executar l'ordre, o amb el símbol ! (ASCII 33) si hi ha algun error de sintaxi (veure taula 3).

El segon element del telegrama (denotat com a Id) és l'identificador de cada comanda. Cada microprocessador està programat [9] per interpretar-la i respondre segons convingui). Per exemple, en cas que el telegrama sigui un “ping”, l'identificador és STMP. La comanda per fer “Reset” als interlocks té Id = REIR, i la comanda per activar o desactivar l'interlock T2 (de la línia *Trigger*, veure secció 6), té identificador Id = RERE, etc. Alguns dels identificadors programats es troben llistats a la taula 4 [9]. A més, per a la realització d'aquest projecte, s'ha introduït un nou identificador amb Id = CHST associat al canvi de la variable de l'estat del microtró, entre els seus tres estats (*Warming up*, *Standby* i *Ready*). La variable STATE que determina l'estat té valors 0, 1 i 2, respectivament.

| Identificador (Id) | Descripció   | Possibles valors del paràmetre |
|--------------------|--|--------------------------------|
| STMP               | ping, petició de dades de l'estat dels sistemes controlats pel microcontrolador. | -                              |
| REIR               | Fer reset als interlocks   | 0 , 1                          |
| RERE               | Activar/desactivar l'interlock T2  | 0 , 1                          |
| CHST               | Canviar l'estat del microtró<br>( <i>Warming up, Standby, Ready</i> )            | 0 , 1 , 2                      |

Taula 4: Taula dels identificadors.

Després de l'identificador i suposant que el microprocessador ha interpretat correctament el telegrama i no s'ha produït cap error (en aquest cas el telegrama de resposta començaria per “#” o “!”), la resposta té diferents formats segons si és un ping, un *write* o un *read*.

- Si el telegrama és un ping, després de l'identificador la resposta conté, separats per “/”, cadascun dels paràmetres demanats al ping.

**Exemple 1:** Es fa un ping al microcontrolador MC1

Request: (P/STMP)

Reply: (p/STMP/0/2/0/0/1/0/1/0/1/513/4847)

- Si el telegrama és un *write*, l'estructura de la resposta és idèntica a la petició, el valor del paràmetre és el valor actualitzat.

**Exemple 2:** Es demana canviar a mode automàtic

Request: (W/MODE/1)

Reply: (w/MODE/1)

- o I per últim, si el telegrama és un *read*, la resposta conté el valor de la variable consultada.

**Exemple 3:** Es demana consultar en quin mode es troba el microprocessador. El microcontrolador respon que es troba en mode manual (paràmetre MODE = 0).

Request: (R/MODE)

Reply: (r/MODE/0)

Aquesta estructura de telegrama és la que s'utilitza per la comunicació amb els microcontroladors d'Arduino (MC1, MC2, MC3 i MC4).

El controlador ADAM (el mòdul de lectura de temperatures) té la seva pròpia estructura (determinada pel proveïdor) però és molt semblant a la descrita a la taula 3 (s'utilitzen barres verticals “|” ASCII 124 en comptes de la barra inclinada “/” ASCII 47, i s'utilitzen “{” i “}” (ASCII 123 i ASCII 125) en comptes dels parèntesis ASCII 40 i ASCII 41 que s'utilitzen en els telegrames amb MC1 fins a MC4).

Adicionalment i per tal d'assegurar una operació estable, el sistema de control revisa contínuament la continuïtat de comunicació. Si després d'un missatge ping enviat a un dels microcontroladors no es rep resposta en un cert temps (al voltant d'un segon), s'activa l'interlock E9 (veure taula 2) de pèrdua de comunicació i el sistema de control ordena la parada de l'emissió del feix i obliga a tots els microprocessadors a passar al mode d'operació *safe* i a canviar l'estat del microtró (veure apartat 9.1).

## 8. LabVIEW

### 8.1. Introducció a LabVIEW

Un dels elements del sistema de control de l'RTM és el PC principal, que compta amb la interfície gràfica d'usuari (GUI) que permet a l'operador monitoritzar i controlar els diferents mòduls i sistemes de l'accelerador, i que per tant fa la funció de consola d'operador (OC, de l'anglès *Operator Console*).

Com ja s'ha avançat anteriorment, tant la GUI com la comunicació del PC amb els diferents mòduls està programada en LabVIEW [7] un entorn de programació gràfica creat per National Instruments l'any 1976 i que permet controlar i adquirir dades des de qualsevol instrument. Els fitxers de LabVIEW tenen extensió .VI i consten d'un panell frontal (la GUI amb la qual l'usuari interacciona) i un diagrama de blocs (el codi pròpiament dit). La figura 12 mostra un exemple molt senzill d'un programa fet en LabVIEW.

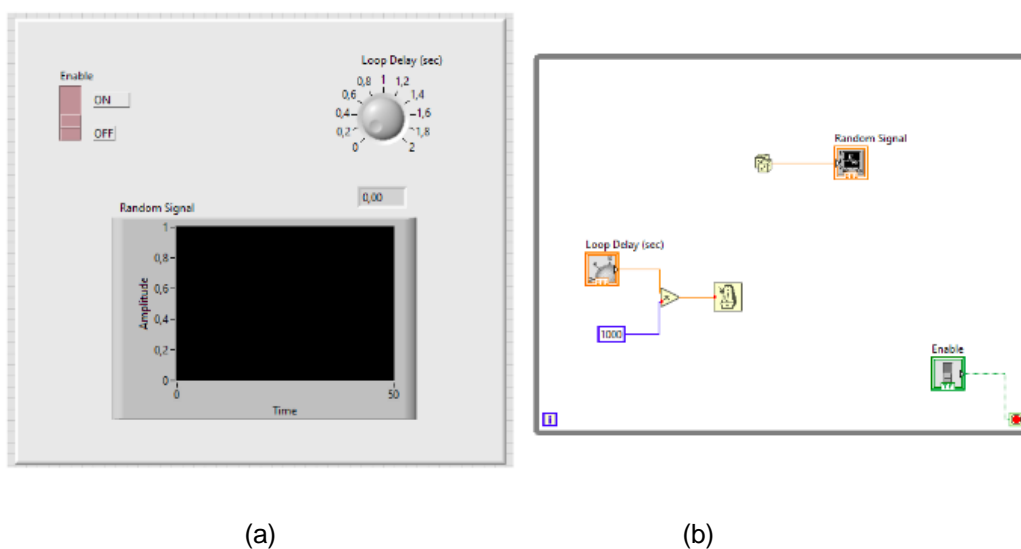







Figura 12: (a) Panell frontal. (b) Diagrama de blocs amb el codi

### 8.2. Elements i estructures de LabVIEW

LabVIEW permet l'ús de moltes estructures, elements i recursos diferents per realitzar diferents tasques. A la pàgina de National Instruments [10] es pot trobar una llista completa dels elements que es poden trobar en el diagrama de blocs d'un programa de LabVIEW.

Per a la comprensió del codi pot ser útil mencionar que LabVIEW utilitza diferents colors pels diferents tipus de dades. Per exemple, les dades de tipus *string* es mostren de color rosa, les numèriques de doble precisió o DBL en color taronja, les numèriques de precisió simple en color blau, i les dades booleanes o TF, en color verd.

Les estructures d'execució [11] que s'utilitzaran en el desenvolupament del mòdul es troben explicades a la taula 5.

| Nom i símbol   | Principi de funcionament   |
|--|--|
| <br>While Loop        | Executa contínuament el codi interior fins que no es fa un "stop" (per exemple des d'un control).  |
| <br>For Loop          | Executa el codi un número de vegades finit, especificat a N. El nombre d'iteracions es pot llegir a i.   |
| <br>Case Structure  | Va connectat a una variable. Depenent del valor de la variable d'entrada, s'executa un codi o un altre (situats en pestanyes diferents)  |
| <br>Event Structure | Conté diferents events. Cada event va associat al canvi de valor d'una o més variables especificades i per tant el codi de cada event només s'executa si hi ha hagut un canvi en aquestes variables. |
| <br>Flat Sequence   | Executa el codi de cada pestanya de manera seqüencial, en ordre.   |

Taula 5: Llistat d'estructures d'execució de LabVIEW utilitzades.

### 8.3. Programa principal i subrutines

Pel projecte de l'RTM de 12 MeV, la consola d'operador consta d'un .VI principal de grans dimensions ja programat amb la majoria de funcionalitats (recollida, tractament i mostra de

dades) en el que s'haurà d'implementar el codi desenvolupat en aquest projecte, i una sèrie de subrutines (sub .VI) de les que se'n farà ús, dedicades a la comunicació amb els diferents mòduls de control per mitjà de protocol TCP/IP.

## 9. Modes d'operació del microtró

### 9.1. Estats de l'RTM

Segons el disseny general de l'RTM, l'accelerador pot operar en tres estats diferents. El primer estat, *Warming up*, és un estat de preparació prèvia en què es pot posar en marxa el *chiller* del sistema de refrigeració, començar a escalfar el filament del canó d'electrons i el magnetró o definir alguns paràmetres inicials. El segon estat és *Standby*, un estat en el que l'RTM està en condicions per operar però encara no es permet la generació de polsos HV al modulador. En aquest estat es poden seleccionar paràmetres de funcionament del microtró, com per exemple l'energia del feix o la freqüència de repetició de polsos del modulador. El tercer i últim estat és *Ready*, l'estat en què totes les variables crucials del microtró estan en ordre, tots els interlocks desactivats, no es produeixen ajustaments dels sistemes (per exemple no es mouen els imants d'extracció) i l'operador pot activar la generació de polsos HV al modulador, i per tant emetre el feix d'electrons.

En cadascun d'aquests estats es defineixen les accions a la consola que l'operador pot realitzar, i per cadascun dels estats, es defineixen les condicions que s'han de complir per poder estar en tal estat (dades a les taules 6 i 7).

Tal com s'ha avançat anteriorment, és convenient introduir una variable STATE que pot prendre valors 0,1 o 2 codificant els diferents estats.

STATE = 0, *Warming up*

STATE = 1, *Standby*

STATE = 2, *Ready*



## 9.2. Accions permeses en cada estat

| Acció  | <i>Warming up</i>     | <i>Standby</i>        | <i>Ready</i> |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Passar l'RTM a l'estat <i>Warming Up</i>   | -                     | Sí                    | Sí           |
| Passar l'RTM a l'estat <i>Standby</i>  | Subjecte a condicions | -                     | Sí           |
| Passar l'RTM a l'estat <i>Ready</i>  | Subjecte a condicions | Subjecte a condicions | -            |
| Girar la clau principal de seguretat al selector i entrar al <i>hall</i> de l'accelerador (búnquer)    | Sí                    | No                    | No           |
| Enviar comanda als mòduls M1 a M4 per passar a <i>Normal mode</i>                                      | Sí                    | N/A                   | N/A          |
| Enviar comanda als mòduls M1 a M4 per passar a <i>Safe mode</i>  | Sí                    | Sí                    | Sí           |
| Posar el modulador en <i>Standby</i> , iniciar l'escalfament del filament del canó d'electrons         | Sí                    | N/A                   | N/A          |
| Posar el modulador en <i>HV on</i>   | No                    | Sí                    | Sí           |
| Posar el modulador en <i>Trig On</i>   | No                    | No                    | Sí           |
| Apagar les fonts de potència dels sistemes (excepte la bomba iònica i el transductor atmosfera-a-buit) | Sí                    | N/A                   | N/A          |
| Subministrar 400V CA al modulador  | No                    | Sí                    | Sí           |
| Desconnectar 400V CA del modulador   | N/A                   | Sí                    | Sí           |
| Encendre el <i>chiller</i>   | Sí                    | N/A                   | N/A          |
| Encendre/apagar la bomba turbomolecular  | Sí                    | Sí                    | No           |
| Obrir i tancar vàlvules del sistema de gas SF <sub>6</sub>   | Sí                    | No                    | No           |

|  |    |    |    |
|--|----|----|----|
| Encendre/apagar la bomba del sistema de gas SF <sub>6</sub>                              | Sí | No | No |
| Llegir i modificar la configuració del sensor de pressió (transductor atmosfera-a-buit)  | Sí | No | No |
| Llegir paràmetres dels sistemes de refrigeració i buit, i les temperatures dels sensors. | Sí | Sí | Sí |
| Fer "Reset" a les línies d'interlocks <i>External</i> i <i>Vacuum</i>                    | Sí | Sí | No |
| Moure els imants d'extracció i configurar l'energia del feix                             | Sí | Sí | No |
| Configurar altres paràmetres del sistema   | Sí | No | No |

Taula 6: Accions permeses en cada estat del microtró

### 9.3. Condicions d'estat del microtró

Les condicions que requereix cada estat es troben llistades a la taula 7. A la segona columna s'indica el paràmetre a controlar, en la tercera el valor que ha de prendre aquest paràmetre per tal que la condició es consideri satisfeta, en la quarta l'estat o estats que requereixen que aquesta condició sigui certa, i a l'última columna, quin sistema proporciona la dada en qüestió.

| Paràmetre | Situació OK    | Estats que requereixen OK | Sistema que proporciona la dada OK |
|-----------|----------------|---------------------------|------------------------------------|
| Modulador | <i>Standby</i> | 1,2                       | Sistema de control del modulador   |
| Modulador | <i>HV</i>      | 2                         | Sistema de control del modulador   |

|                                     |  |     |                                  |
|-------------------------------------|--|-----|----------------------------------|
| Modulador                           | <i>Trigger</i>   | 2   | Sistema de control del modulador |
| Bomba iònica                        | <i>HV on</i>   | 1,2 | V2                               |
| PLC                                 | Perímetre de seguretat tancat  | 1,2 | E10                              |
| Porta búnquer                       | Porta del búnquer tancada  | 2   | E2, PLC                          |
| Polsadors d'emergència del búnquer  | No està premut cap dels botons d'emergència de l'interior del búnquer                | 1,2 | E11, PLC                         |
| Clau del selector                   | Clau en el selector en posició ON  | 1,2 | E12, PLC                         |
| Polsador d'emergència de l'operador | No està premut el polsador d'emergència de l'operador                                | 1,2 | E4                               |
| Comunicació Consola - MCs           | Existeix comunicació amb tots els MCs  | 1,2 | E9                               |
| "Normal mode"                       | Tots els MCs es troben en "Normal mode"  | 1,2 | E9                               |
| Imants d'extracció                  | Els imants no es troben en moviment i l'interruptor de fi de carrera no està activat | 2   | E8                               |
| Feix                                | " <i>Beam permit</i> " està desactivat   | -   | T2, Consola                      |
| Arcs a la guia d'ona                | El nombre d'arcs produïts és inferior a $N_{\max} = 5$                               | -   | T1                               |
| Pressió a la cambra de buit         | $p_{vac} < 3 \cdot 10^{-6} mbar$   | 1,2 | V1                               |
| Cabal de l'aigua de refrigeració    | $Q_w > 4 l/min$  | 1,2 | E7                               |
| Pressió del gas a la guia d'ona     | $p_{SF6} > 1.8 bar$  | 1,2 | E3                               |

|  |   |                                   |    |
|--|---|-----------------------------------|----|
| Cabal d'aire                           | El cabal d'aire és superior a un límit que s'estableix empíricament durant el calibratge. | 1,2                               | E5 |
| Temperatura del magnetró (font de RF)  | $T_{magnetron} < 45^{\circ}\text{C}$  | 2                                 | E6 |
| Temperatura de l'aigua de refrigeració | $T_w < 40^{\circ}\text{C}$  | 2                                 | E1 |
| <i>External</i> interlocks             | Tots els interlocks E1 – E12 desactivats  | 1,2 or 2, depenent de l'interlock | Es |
| <i>Vacuum</i> interlocks               | V1, V2 desactivats  | 1,2                               | Vs |
| <i>Trigger</i> interlocks              | T1, T2 desactivats  | -                                 | Ts |

Taula 7: Condicions dels estats del microtró.

## 10. Lògica del mòdul de canvi d'estat

### 10.1. Reinterpretació de les condicions

Totes les condicions definides a l'apartat 9.3 deriven en la següent interpretació:

Es poden dividir les condicions en dos blocs A i B. El primer bloc A és el bloc de condicions que s'han de complir per tal que el microtró es trobi en estat *Standby*. Si alguna de les condicions d'aquest bloc A no es compleix, el mòdul ha de fer retornar el microtró a l'estat *Warming up*. El segon bloc B, el conformen aquelles condicions necessàries però no suficients per estar en l'estat *Ready*.

En altres paraules, l'estat *Ready* requereix que es compleixin les condicions dels dos blocs A i B, mentre que l'estat *Standby* només requereix el compliment de les condicions del bloc A.

Si en estat *Ready* alguna de les condicions del bloc B no es compleix, el mòdul ha de retornar el microtró a l'estat *Standby*. Si alguna de les condicions del bloc A no es compleix, sigui quin sigui l'estat en el que es troba el microtró, el mòdul ha de retornar-lo a l'estat *Warming up*.

Pel desenvolupament del mòdul de canvi d'estat, per tal de simplificar el tractament de dades, s'utilitzen únicament les dades d'interlocks (veure taules 2 i 8) per formar els blocs de condicions A i B (si no es compleix la condició, l'interlock està activat (*True*, i es codifica amb un 1) i si es compleix, l'interlock està desactivat (*False*, i es codifica amb un 0)). Notem que els senyals provinents de la línia d'interlocks *Trigger* no influeixen sobre l'estat del microtró, sinó que aquests només es comprovarien posteriorment, en cas d'estar en estat *Ready*, quan es vol activar l'emissió del feix.

Una condició s'inclou al bloc A o al B en funció del nivell de gravetat de la situació creada pel seu incompliment. Per exemple, si la pressió a la cambra de buit ha superat el valor crític de  $3 \cdot 10^{-6}$  mbar (interlock V1 "Mal buit") el microtró ha de passar a l'estat *Warming up*.

L'operador haurà de realitzar una inspecció del sistema de buit, trobar la causa del problema i dur a terme el procés de bombeig, que pot trigar hores i que pot necessitar la posada en marxa de la bomba turbomolecular.

En canvi, si l'operador ha enviat l'ordre de posicionament dels imants d'extracció en la posició d'extracció de l'òrbita d'una certa energia, mentre el conjunt d'imants estigui en moviment, es manté obert el relé de l'interlock E8 (veure taula 2). Com que és simplement una operació de canvi de l'energia del feix, el microtró pot romandre a l'estat *Standby*, i per tant aquesta condició és del bloc B.

| Interlocks que condicionen els blocs A i B   |   |
|--|---|
| Bloc A   | Bloc B  |
| <p><u>External:</u></p> <p>E3, E4, E5, E7, E9, E10, E11, E12</p> <p><u>Vacuum:</u></p> <p>V1, V2</p> | <p><u>External:</u></p> <p>E1, E2, E6, E8</p> |

Taula 8: Llistat d'interlocks desactivats per a què es compleixin les condicions dels blocs A i B.

### 10.2. Esquema i taula resum

D'una forma més visual, l'esquema de la figura 13 il·lustra la lògica del mòdul de canvi d'estat explicada a l'apartat anterior. Notem que en alguns casos l'acció a realitzar pel mòdul no depèn del valor d'alguna de les variables (en aquest cas, es marca amb una X).

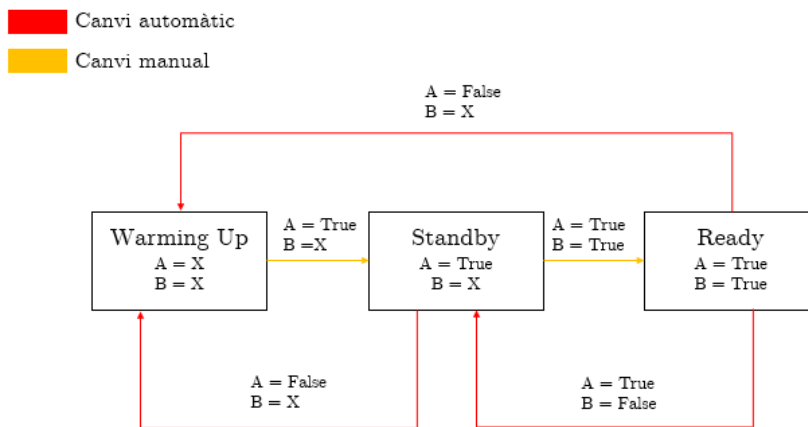


Figura 13: Diagrama de blocs de la lògica del canvi d'estat

En referència a la figura 13, els canvis manuals (en color taronja) estan permesos a l'operador però per tal que es portin a terme aquest ha de donar l'ordre des de la consola (prement el polsador corresponent).

Pel que fa als canvis automàtics (en color vermell), si el mòdul detecta que hi ha alguna condició essencial per a tal estat que s'ha deixat de complir, aquest ha de fer passar obligatòriament el microtró a un estat inferior, *Warming up* o *Standby*, en funció de les condicions que es deixen de complir.

| Estat inicial | Condicions A | Condicions B | Següent estat<br>(canvi automàtic) | Següent estat<br>(canvi manual) |
|---------------|--------------|--------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 0             | 0            | 0            | -                                  | 0                               |
| 0             | 0            | 1            | -                                  | 0                               |
| 0             | 1            | 0            | -                                  | 0,1                             |
| 0             | 1            | 1            | -                                  | 0,1,2                           |
| 1             | 0            | 0            | 0                                  | 0                               |
| 1             | 0            | 1            | 0                                  | 0                               |
| 1             | 1            | 0            | -                                  | 0,1                             |
| 1             | 1            | 1            | -                                  | 0,1,2                           |
| 2             | 0            | 0            | 0                                  | 0                               |
| 2             | 0            | 1            | 0                                  | 0                               |
| 2             | 1            | 0            | 1                                  | 0,1                             |
| 2             | 1            | 1            | -                                  | 0,1,2                           |

Taula 9: Taula resum de la lògica del mòdul.

A la taula 9, la codificació dels estats per l'estat inicial (columna 1) i els següents estats

(columnes 4 i 5) és la que s'ha definit anteriorment:

- *Warming Up* = 0
- *Standby* = 1
- *Ready* = 2.

La codificació booleana pel compliment de les condicions A i B és True = 1 i False = 0.

La taula 9 mostra com es modifica un estat inicial en funció de si es compleixen o no les condicions dels blocs A i B. A la columna 4 s'indica l'estat final o següent estat, en cas que s'hagi de produir un canvi automàtic, i a la columna 5 s'indiquen els possibles estats permesos a seleccionar per l'operador, en cas que no calgui un canvi automàtic.

Sempre que es canviï d'estat, sigui per acció automàtica del mòdul (columna 4) o per acció permesa a l'operador (columna 5), el mòdul ha d'enviar una comanda *write* (W) als microcontroladors amb estructura (W/CHST/X), on X és l'estat al que ha de canviar el microtró (0,1 o 2 que codifiquen *Warming up*, *Standby* i *Ready*, respectivament).

Adicionalment, com es veurà a continuació (veure secció 11), l'operador podrà realitzar "Reset" als relés dels interlocks, és a dir rearmar-los, però només si el microtró es troba en els estats 0 o 1. En aquest cas, el mòdul ha d'enviar la comanda (w/REIR/1). Si el microtró es troba en estat 2, l'operador pot desactivar l'interlock "*Beam permit*" des de la consola, i en aquest cas s'envia la comanda (w/RERE/1).

## 11. Desenvolupament del mòdul de canvi d'estat

Una vegada s'ha definit la lògica del funcionament del mòdul de canvi d'estat, s'ha de traslladar el concepte a un programa de LabVIEW amb el seu panell frontal i el seu diagrama de blocs. El que es presenta a continuació és un prototip del mòdul de canvi d'estat que s'incorporarà al codi .VI de la consola existent més endavant. L'objectiu d'aquest prototip és realitzar operacions seguint la mateixa lògica però amb les dades d'interlocks provinents únicament de MC1, és a dir, els blocs de condicions A (condicions necessàries i suficients per estar en estat *Standby*) i B (condicions necessàries per estar en estat *Ready*) més reduïts respecte les condicions que es mostren a la taula 7 per tal de facilitar-ne el tractament (veure taula 8).



El desenvolupament d'aquest mòdul comporta, com ja s'ha mencionat amb anterioritat, la implementació, en codi Arduino a cadascun dels microcontroladors de MC1 a MC4, d'una nova comanda [9] amb Id = CHST (sigles que fan referència a *change state*). Aquesta comanda, en què cadascun dels estats es codifica amb 0, 1 o 2, és la que s'envia des del mòdul de canvi d'estat per ordenar el canvi d'estat del microtró. La seva implementació en el codi del MC1 i MC3 s'ha realitzat en el treball [9].

La seqüència general de funcionament del mòdul de canvi d'estat és:

1. Inicialització
2. Obertura canal de comunicació
3. Petició i recepció del ping
4. Lectura de dades
5. Comprovació dels blocs de condicions A i B
6. Canvi d'estat (en funció del compliment A i B) seguint l'esquema de la figura 13
7. Enviament de la comanda CHST

Adicionalment, tot i que inicialment només es contemplava la programació del canvi d'estat, el mòdul també incorpora la possibilitat de rearmar els relés (fer "Reset" si l'estat és *Warming up* o *Standby*), desactivar l'interlock T2 "*Beam permit*" al MC1 i permetre l'emissió del feix si l'operador ho indica al panell frontal i alhora el microtró està en estat *Ready*.

### 11.1. Panell frontal

La figura 14 mostra el panell frontal del mòdul de canvi d'estat i a la taula 10 es llisten els seus elements i la funció de cadascun d'ells.

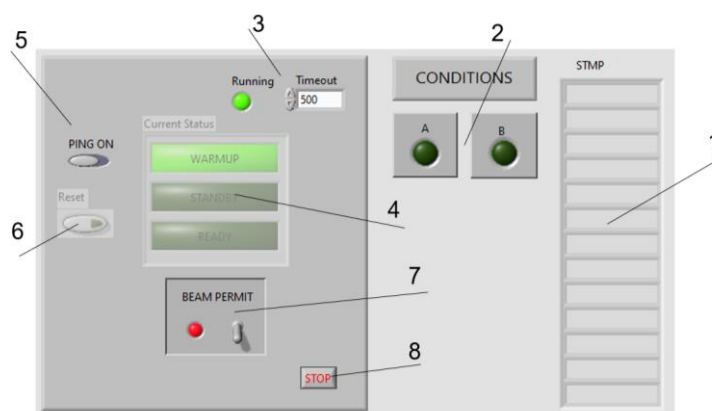


Figura 14: Panell frontal del mòdul de canvi d'estat

| Element | Descripció  |
|---------|---|
| 1       | Un indicador que mostra les dades del ping que envia MC1 un cop s'ha fet lliscar l'element 5.   |
| 2       | Dos LEDs A i B que s'encenen únicament si totes les condicions del bloc corresponent es compleixen.   |
| 3       | Un control anomenat "Timeout" en què l'operador introdueix la periodicitat en mil·lisegons d'enviament de la petició ping per part del mòdul. El LED "Running" permet visualitzar aquest temps especificat en "Timeout". (Si el timeout és 500 ms el LED s'encén, es manté encès 500 ms, s'apaga, es manté apagat 500 ms, i així successivament).                               |
| 4       | Polsadors de canvi manual de l'estat del microtró. Únicament un dels tres polsadors pot estar encès (indicant l'estat actual). Si l'operador prem per canviar d'estat i el canvi es permet, el polsador il·luminat passa a ser el que ha premut l'operador. Si no es permet el canvi, el polsador premut per l'operador s'encén breument però el mòdul torna a l'estat inicial. |
| 5       | Un interruptor que en fer-lo lliscar, habilita l'element 4 (prèviament inhabilitat en color gris) i l'enviament del ping, resposta del qual es mostra en l'element 1.   |
| 6       | Polsador únicament habilitat en els estats <i>Warming up</i> i <i>Standby</i> . Quan és premut, s'envia la comanda REIR per rearmar els relés.  |
| 7       | Consta d'una palanca i un LED. Si l'operador apuja la palanca, aquesta només es manté apujada si l'estat és <i>Ready</i> (moment en què s'envia la comanda RERE per desactivar l'interlock T2 i permetre l'emissió del feix). En els estats <i>Warming up</i> i <i>Standby</i> , retorna a la posició inferior. Només s'encén el LED quan la palanca es manté apujada.          |
| 8       | Control per aturar l'execució del programa.   |

Taula 10: Descripció dels elements del panell frontal

## 11.2. Estructura del diagrama de blocs

Per dur a terme totes les funcionalitats definides segons les especificacions del disseny, el programa consta de les variables que es mostren a la figura 15.

L'estructura (veure taula 5) general del codi és un "flat sequence" amb dos casos: el primer inicialitza les variables i el segon conté l'estructura "while" que permet que el codi s'executi contínuament. A l'interior del "while" es troba un "event case" amb cinc casos: *Timeout*, *"Datos": Value Change*, *"Current Status"*, *"A", "B": Value Change*, *"Reset": Value Change* i *"Beam permit": Value Change*.

En el *Timeout* es comprova si es pot permetre l'emissió del feix o no (*"Beam permit"*) i es fa la petició i recepció del ping (veure figura 16). En l'event *"Datos": Value Change* es fa el tractament de dades i la comprovació dels blocs de condicions A i B, en l'event *"Current Status"*, *"A", "B": Value Change* es realitza el canvi d'estat (s'envia la comanda CHST) en funció del compliment de les condicions dels blocs A i B, i s'inhabiliten, si cal, alguns controls del panell frontal (la figura 17 mostra el cas en què l'operador vol canviar a *Ready*, el canvi es permet i s'inhabilita el polsador "Reset"). En l'event *"Reset": Value Change* s'envia la comanda REIR si l'operador prem el polsador, i en l'últim event, *"Beam permit": Value Change*, s'envia la comanda RERE si es permet l'emissió del feix.

Es poden trobar imatges més completes del diagrama de blocs a l'Annex A.

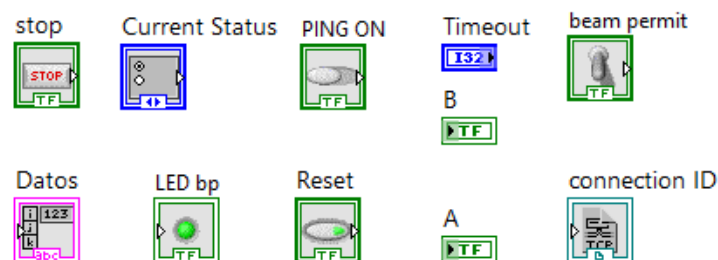


Figura 15: Variables del diagrama de blocs del mòdul de canvi d'estat.

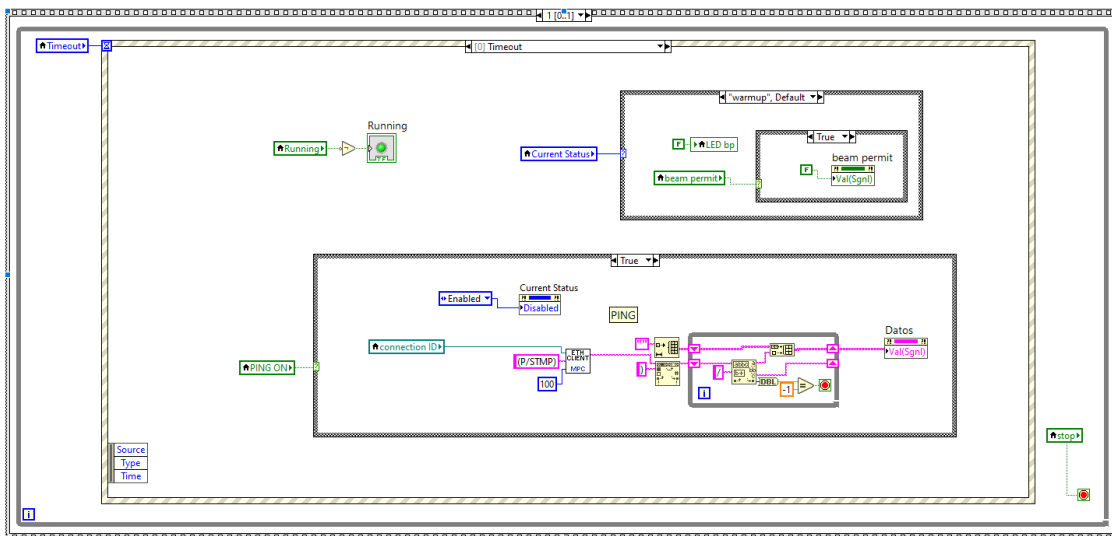


Figura 16: Diagrama de blocs del cas Timeout

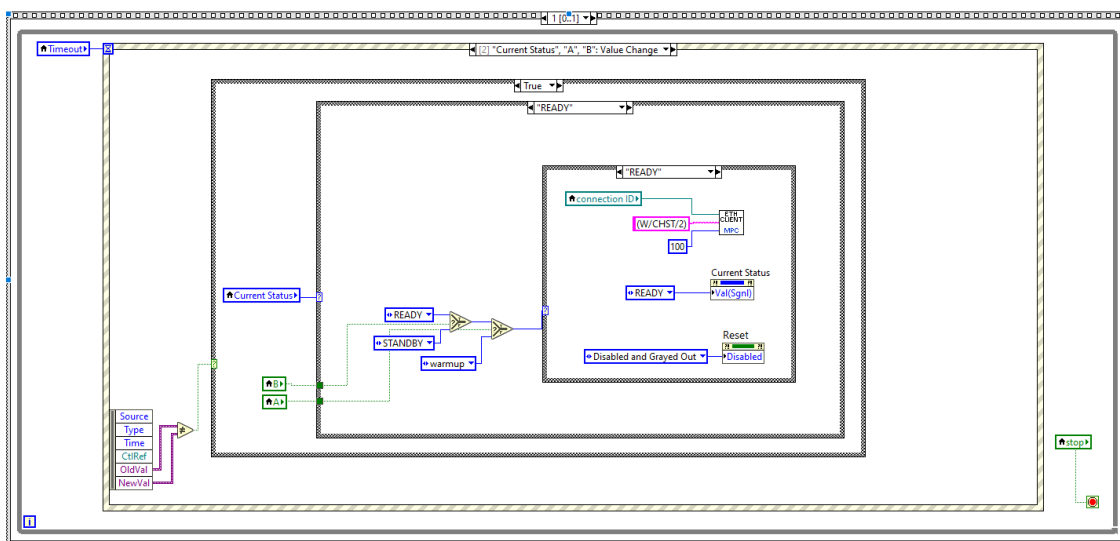


Figura 17: Diagrama de blocs del cas "Current Status", "A", "B" : Value Change en el cas que l'operador vulgui passar a "Ready" i es permeti el canvi.

## 12. Proves de funcionament i comunicació

Un cop finalitzat el desenvolupament del mòdul de canvi d'estat, s'han realitzat proves del seu funcionament i la comunicació amb el microcontrolador del mòdul M1 (que proporciona les dades d'interlocks, veure apartat 7.1). Aquestes proves s'han dut a terme al Laboratori d'Acceleradors de Partícules de l'INTE situat a l'edifici C del Campus Diagonal-Besòs de la UPC.

### 12.1. Muntatge experimental

Per la realització de les proves es disposa del mòdul d'interlocks (figura 18a) del microtró que conté el microcontrolador MC1 de tipus Arduino Mega i els relés associats a cada interlock. El mòdul està alimentat per una font d'alimentació (veure figura 18b) que subministra una tensió de 12V CC als relés i una tensió de 9V CC al microcontrolador.

Per a fer les proves de funcionament, s'utilitza una maqueta amb interruptors (veure figura 19a) que permeten l'obertura i tancament manual dels relés dins el mòdul, simulant situacions d'activació d'interlocks durant el funcionament del microtró. Quan un dels relés s'obre, el seu LED (*Light-emitting diode*) associat (de color vermell a la figura 19a) s'encén. Quan tots els interlocks d'una mateixa línia (*External*, *Vacuum* o *Trigger*, veure secció 6) estan desactivats, s'encén un altre LED associat a cada línia (colors vermell, verd i blau a la part superior dreta de la figura 18a).

El mòdul d'interlocks es connecta amb l'ordinador portàtil, on s'executa el mòdul de canvi d'estat programat en LabVIEW, per un cable Ethernet a través d'un *switch* (figura 19b) entre els dos dispositius.

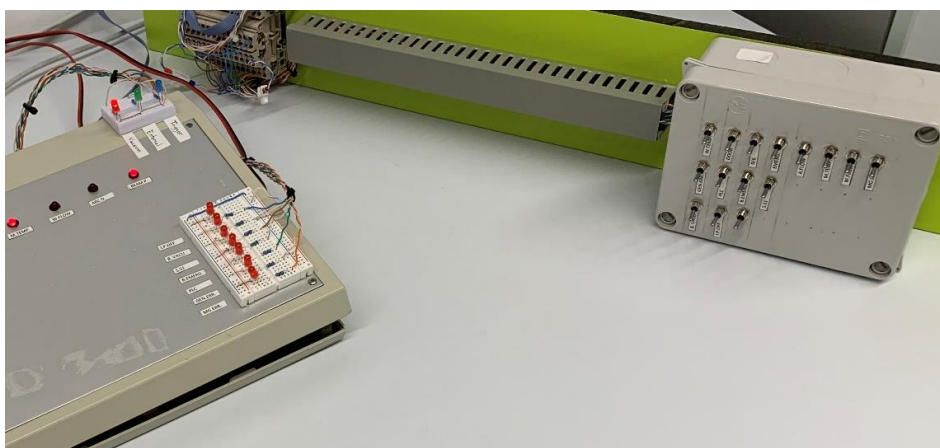


(a)



(b)

Figura 18: (a) Mòdul d'interlocks. (b) Font d'alimentació.



(a)



(b)

Figura 19: (a) Mòdul d'interlocks (a l'esquerra) juntament amb la maqueta dels interruptors (a la dreta).  
(b) Switch a través del qual es realitza la comunicació entre l'Arduino del mòdul M1 i el portàtil.

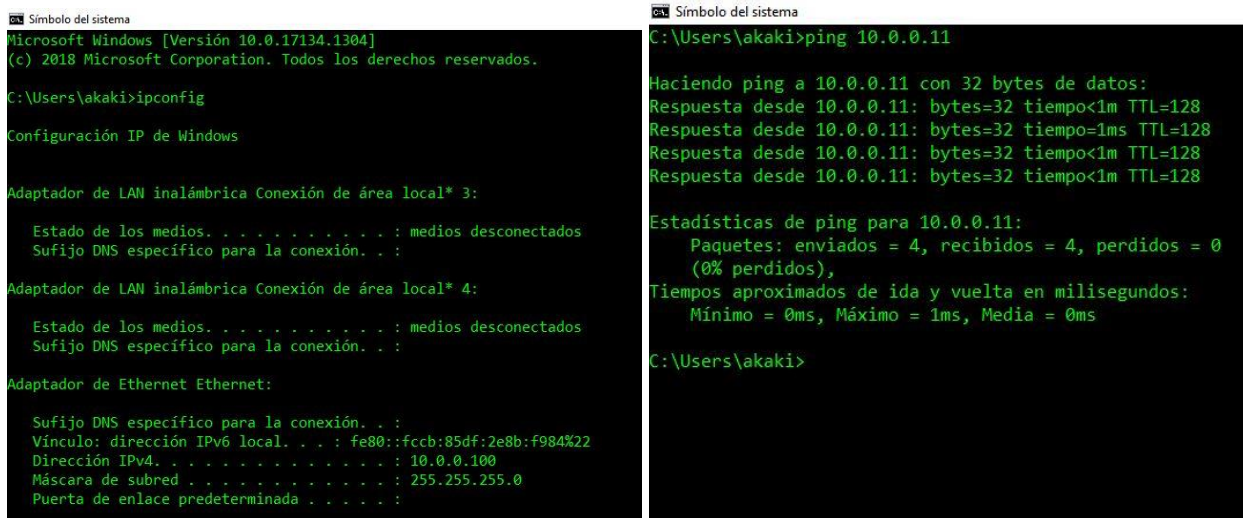
## 12.2. Comunicació

Les fases de preparació prèvies a l'execució del mòdul de canvi d'estat són:

- (1) Es posa en marxa la font d'alimentació que alimenta el mòdul d'interlocks i el microcontrolador MC1. La situació de partida un cop s'encén la font és que tots els interlocks es torben activats excepte l'interlock T1 (veure figura 18a), que en la maqueta no es troba connectat a cap relé (caldrà fer un "Reset" a l'inici).
- (2) Es configura el portàtil on s'executa el codi de LabVIEW del mòdul de canvi d'estat per tal que s'estableixi la seva comunicació amb el microcontrolador MC1 a través de la xarxa local (figura 20a) amb les dades següents:

```
IP ordinador: 10.0.0.100
IP microcontrolador: 10.0.0.11
Màscara ordinador: 255.255.255.0
Màscara microcontrolador: 255.0.0.0
```

- (3) Es comprova que s'ha establert la connexió entre l'ordinador i el microprocessador enviant un ping des del CMD (*command prompt*) de Windows (figura 20b)
- (4) Un cop comprovat que hi ha comunicació, s'obre comunicació pel protocol Telnet (veure figura 21) que permet veure les dades a la resposta ping enviades al mòdul de canvi d'estat des de MC1 i també les respostes a les comandes CHST, RERE i REIR que s'envien des del mòdul de canvi d'estat.



(a)

(b)

Figura 20: (a) Configuració de la IP i la màscara de subxarxa de l'ordinador. (b) Ping a la IP del microcontrolador.

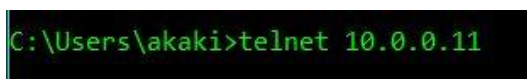


Figura 21: Obertura de la comunicació pel Telnet.

### 12.3. Resultats obtinguts

Per tal de comprovar el correcte funcionament del mòdul s'ha realitzat una sèrie de proves amb el mòdul d'interlocks, el microcontrolador MC1 i la maqueta (veure l'apartat 12.1) seguint un protocol d'accions i verificant si el resultat d'actuació del mòdul és el previst.

Primerament, es comprova que s'inicialitzen totes les variables correctament i que la comunicació segueix el protocol establert.

En segon lloc, es comprova que en estar en estat *Ready*, en no complir-se alguna de les condicions del bloc A (algun interlock del bloc A activat), el mòdul obliga el microtró a passar a l'estat *Warming up*.

A continuació, es comprova que en estat *Ready*, en no complir-se alguna de les condicions



del bloc B (algun interlock del bloc B activat), el mòdul obliga el microtró a passar a l'estat *Standby*, tot enviant la comanda corresponent.

Finalment es comprova, entre d'altres, que rearmar els relés amb el polsador "Reset" únicament es pot realitzar en els estats *Warming up* i *Standby* (veure taula 6), que el control "Timeout" funciona correctament, o que l'activació de l'interlock T2 "*Beam permit*" només es pot realitzar en estat *Ready*.

El detall de cada prova realitzada, el resultat esperat i el resultat obtingut es troba a la taula B.1 de l'Annex B.

Després d'haver realitzat proves exhaustives d'inicialització del mòdul de canvi d'estat i de la seva comunicació amb el microcontrolador MC1, i haver simulat diferents situacions d'activació dels interlocks, es pot concloure que els resultats han estat satisfactoris, el mòdul s'ha comportat segons les especificacions del disseny.

### **13. Estudi econòmic**

Es pot fer una estimació del cost total del projecte tenint en compte en primer lloc els costos associats al personal, que depenen de la tasca realitzada (cerca d'informació i contextualització, realització del projecte o preparació dels resultats) es computaran a preus diferents, i en segon lloc, els costos d'infraestructura, que englobarien els dispositius, materials i programari emprats.

| Tasca realitzada                       | Hores dedicades | Preu/hora    | Cost         |
|--|-----------------|--------------|--------------|
| Cerca d'informació i contextualització | 150h            | 25€/h        | 3750€        |
| Desplaçaments i dietes                 | 5h              | 10€/h        | 50€          |
| Realització del projecte               | 100h            | 35€/h        | 3500€        |
| Preparació dels resultats              | 50h             | 15€/h        | 750€         |
|  |                 | <b>Total</b> | <b>8050€</b> |

Taula 11: Costos de personal

Pels costos de personal desglossats en més detall a la taula 11, s'ha donat més rellevància en el preu a la tasca de realització del projecte, seguit de la tasca de cerca d'informació i contextualització, la preparació de resultats i per últim, els desplaçaments i dietes derivats directament del projecte.

Pel que fa als costos d'infraestructura (taula 12), des de 2017, la UPC compta amb llicència per a l'educació de LabVIEW (un tipus de llicència especial per centres de docència, diferent a les llicències individuals de caire comercial). El preu d'aquesta llicència no és accessible des de la pàgina web de National Instruments i per tant no es tindrà en compte en el càlcul, cosa que farà que el preu estimat del projecte sigui lleugerament inferior al preu real.

Per l'ús del paquet Microsoft Office (tant Microsoft Word com Microsoft PowerPoint), s'ha utilitzat una llicència individual d'un any de durada que té un preu de 69€, i per tant podem estimar el cost destinat a la realització del projecte, d'uns cinc mesos de durada, fent  $69€/12 \text{ mesos} * 5 \text{ mesos} = 28,75€$ .

L'ordinador emprat per la realització del projecte és d'un any d'antiguitat valorat en uns 1600€ i la quantitat d'hores durant el projecte en què s'ha fet ús d'aquest recurs són unes 300h. Si es considera un cost de manteniment del 15% respecte el preu d'adquisició anual, i un ús també anual de l'ordinador de 1400h, el cost de manteniment d'aquest ordinador és d'uns 60€.

$$\frac{300h * 1600€ * 0,15}{1200h} = 60€$$

Al cost de manteniment se li ha de sumar el cost d'amortització, que com que el dispositiu és relativament nou, ascendeix fins a 400€.

$$\frac{300h * 1600€}{1200h} = 400€$$

El material d'oficina emprat és tan poc que la contribució al cost total és despreciable.

| Concepte                               | Cost           |
|--|----------------|
| Llicència personal de Microsoft Office | 28,75€         |
| Ordinador i costos associats           | 460€           |
| <b>Total infraestructura</b>           | <b>488,75€</b> |

Taula 12: Costos d'infraestructura

Tots aquests factors fan que el cost estimat del projecte realitzat sigui de 8050€ + 488,75€ = 8538,75€

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| Cost total projecte | 8538,75 € |
|---------------------|-----------|

## 14. Impacte ambiental

En tractar-se d'un projecte en què es desenvolupa programari, la realització d'aquest projecte ha generat molt pocs residus directes, però que no es poden considerar nuls.

D'una banda, s'ha de tenir en compte la impressió de part de la documentació disponible i la

realització d'esquemes o anotacions, que comporten la generació de residus en forma de paper i tinta.

D'altra banda, també s'escau mencionar les emissions produïdes pels desplaçaments (tot i que en transport públic) tant a la universitat com al laboratori de proves.

I per últim, durant aquests mesos, tot el consum elèctric utilitzat (no provinent de fonts d'energia renovables) per tal d'alimentar els aparells electrònics emprats (ordinador, teclat, monitor, etc.) així com la il·luminació de l'espai de treball en les hores de poca llum.

### 15. Planificació del projecte

Pel que fa a la planificació del projecte, la taula 13 mostra en forma de diagrama de Gantt cadascuna de les tasques realitzades en el projecte i la seva durada aproximada.

| Tasca  | 2021   |      |       |      |      |
|--|--------|------|-------|------|------|
|  | Febrer | Març | Abril | Maig | Juny |
| Inici projecte   | ■      |      |       |      |      |
| Contextualització del projecte i aprofundiment de coneixements | ■      | ■    | ■     | ■    | ■    |
| Instal·lació i introducció a LabVIEW                           |        | ■    | ■     |      |      |
| Estudi del .VI principal                                       |        | ■    | ■     | ■    |      |
| Plantejament del problema                                      |        |      | ■     | ■    |      |
| Programació del mòdul de canvi d'estats                        |        |      | ■     | ■    | ■    |
| Proves de comunicació al laboratori                            |        |      |       |      | ■    |
| Confecció de la memòria  |        |      |       |      | ■    |
| Fi de projecte   |        |      |       |      | ■    |

Taula 13: Planificació del projecte en un diagrama de Gantt



Com es pot veure a la taula 13, en ser un projecte de grans dimensions ja iniciat en què hi han treballat i hi treballen actualment diverses persones, les tasques de contextualització i aprofundiment de coneixements han durat tota la llargada del projecte. A més, l'eina de treball ha estat LabVIEW, que ha afegit la tasca d'aprendre a programar en aquest entorn, no només per a ser capaç de programar les noves funcionalitats sinó també per entendre i desxifrar el .VI existent.

A partir d'aquí, les tasques de desenvolupament del mòdul han tingut una durada d'uns tres mesos, en què en l'últim mes s'han dut a terme tant les proves de comunicació del mòdul amb els microcontroladors reals que formaran part del microtró, com la confecció de la memòria del projecte.

## Conclusions

El present projecte és una contribució al projecte de l'RTM de 12 MeV que s'està construint a l'INTE. S'ha desenvolupat un mòdul programat en l'entorn LabVIEW que té la funció principal de controlar el canvi entre els estats *Warming up* (un estat de preparació), *Standby* (un estat avançat però que no permet ni la generació de polsos HV ni l'emissió del feix) i *Ready* (un estat en què tot es troba en ordre i es permet l'emissió del feix) del microtró.

S'ha definit la lògica del mòdul, en què totes les condicions de funcionament dels sistemes del microtró s'han agrupat en dos blocs A i B. Les condicions del primer bloc A són necessàries i suficients per estar en estat *Standby* i les condicions del bloc B són necessàries però no suficients per estar en estat *Ready* (en estat *Ready* s'han de complir els dos blocs de condicions).

La lògica del mòdul implica que no es pot passar de *Warming up* a *Standby* si alguna de les condicions del bloc A no es compleix, i que tampoc es pot passar de *Standby* a *Ready* si alguna de les condicions dels blocs A o B no es compleix.

A més, si es deixa de complir alguna condició del bloc A, sigui quin sigui l'estat del microtró, aquest ha de passar a *Warming up* i si es deixa de complir alguna de les condicions del bloc B i s'està en estat *Ready*, el microtró ha de passar a estat *Standby*.

A part de la funcionalitat de controlar el canvi d'estat, també s'han incorporat les funcionalitats de rearmar els interlocks ("Reset") i de permetre l'emissió del feix d'electrons ("*Beam permit*").

En la versió del mòdul de canvi d'estat desenvolupada en el treball, les condicions a comprovar s'han restringit a les provinents dels interlocks del sistema, que es reben des del mòdul M1 del sistema de control del microtró, amb la intenció de facilitar el tractament de dades.

Per a traslladar aquest concepte a un programa de LabVIEW, s'ha dissenyat un panell frontal amb vuit elements: tres polsadors que indiquen l'estat actual i permeten a l'operador canviar-lo en funció d'A i B, un indicador de les dades del ping rebut, dos LEDs que mostren el compliment o no dels blocs de condicions A i B, un control que permet triar l'interval de temps entre cada enviament del ping, un interruptor per habilitar l'enviament automàtic del

ping, un polsador per rearmar els relés, una palanca per habilitar l'emissió del feix i un control "stop" per parar l'execució del programa. També s'ha programat el diagrama de blocs associat per a dur a terme totes les funcionalitats necessàries.

Per comprovar el correcte funcionament del mòdul, s'han realitzat un seguit de proves exhaustives al Laboratori d'Acceleradors de Partícules de l'INTE al Campus Diagonal-Besòs de la UPC amb un mòdul d'interlocks i una maqueta d'interruptors. La maqueta permet obrir els relés manualment, simulant d'aquesta manera diferents situacions d'activació d'interlocks del microtró. Les proves realitzades han demostrat que el mòdul funciona correctament segons les especificacions del disseny.

Tot i així, en tractar-se d'un projecte tan complex com és un microtró d'electrons, el desenvolupament del seu sistema de control no acaba aquí. Un cop obtingut un programa que és capaç de rebre dades d'un microcontrolador, tractar-les i processar-les per tal de permetre o no un canvi d'estat i actuar en conseqüència, s'ha d'implementar el mòdul al programa de LabVIEW principal de la consola d'operador. Per tant, en un futur, s'ha d'ampliar la comunicació a la resta de microcontroladors per poder comprovar el conjunt de condicions senceres i decidir un espai al panell frontal del .VI principal on poder-hi col·locar els controls del nou programa.

Finalment, tot i que treball actual és de caire informàtic i per tant l'impacte ambiental pot semblar nul, s'ha pogut veure que tot i no ser un projecte material, sempre existeix un impacte sobre el medi ambient directe o indirecte que no es pot menysprear.

## Agraïments

Fer especial menció al director d'aquest projecte, Youri Koubychine, per la seva dedicació, implicació i amabilitat excepcionals en tota la durada del projecte.

També agrair al tècnic de laboratori Akaki Mosiashvili per la col·laboració i assistència durant les proves de comunicació, al tècnic informàtic de l'INTE Juan Antonio Romero pels seus suggeriments entorn el programa de LabVIEW, i a l'estudiant de màster David Fernández Linares per proporcionar algunes de les dades dels microcontroladors necessàries per dur a terme el projecte i col·laborar en la fase de proves.



## Referències

- [1] Yu. A. Tsipenyuk, "The Microtron: Development & Applications" (2001).
- [2] Roy E. Rand, "Recirculating electron accelerators", Harwood Academic Publishers (1984).
- [3] SINP - Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, [en línia] [consulta 10 abril 2021]. Disponible a: <http://www.sinp.msu.ru/en>
- [4] B.Ishkhanov, I.N.Pakhomov, N.V.Shvedunov, V.I. Shvedunov and P.Gorbachev, "Conceptual design of the miniature electron accelerator dedicated to IORT", in Proc. of the RUPAC2004, pp.474-476 (2004).
- [5] A.V. Poseryaev, V.I Shvedunov, M.F. Ballester and Y.A. Kubyshin., "Design a 12 MeV RTM for multiple applications", in Proc. of the 10th EPAC'06, Edinburgh, pp.2340-2342 (2006).
- [6] Yu.A. Kubyshin et al., "Control system of a miniature 12 MeV race-track microtron", Proceeding of IPAC-2014, Dresden, pp. 3165-3167 (2014).
- [7] Antonio Mánuel Lázaro, "LabVIEW. Programación gràfica para el control de instrumentación", Paraninfo, 1996.
- [8] Elia Mateu, *Estudi del blindatge de la sala del microtró de 12 MeV de la UPC*, Barcelona: ETSEIB, 2019.
- [9] David Fernández, *Desenvolupament del sistema de control del microtró d'electrons de 12 MeV*, Barcelona, ETSEIB, 2021.
- [10] National Instruments, *Block Diagram Objects* [en línia] [consulta 3 març 2021]. Disponible a: [https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/lvconcepts/block\\_diagram\\_objects/](https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/lvconcepts/block_diagram_objects/)

[11] National instruments, *Execution Structures* [en línia] [consulta 3 març 2021].

Disponible a: <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/execution-structures>