



# Controlar Vácuo & Criogenia nos aceleradores

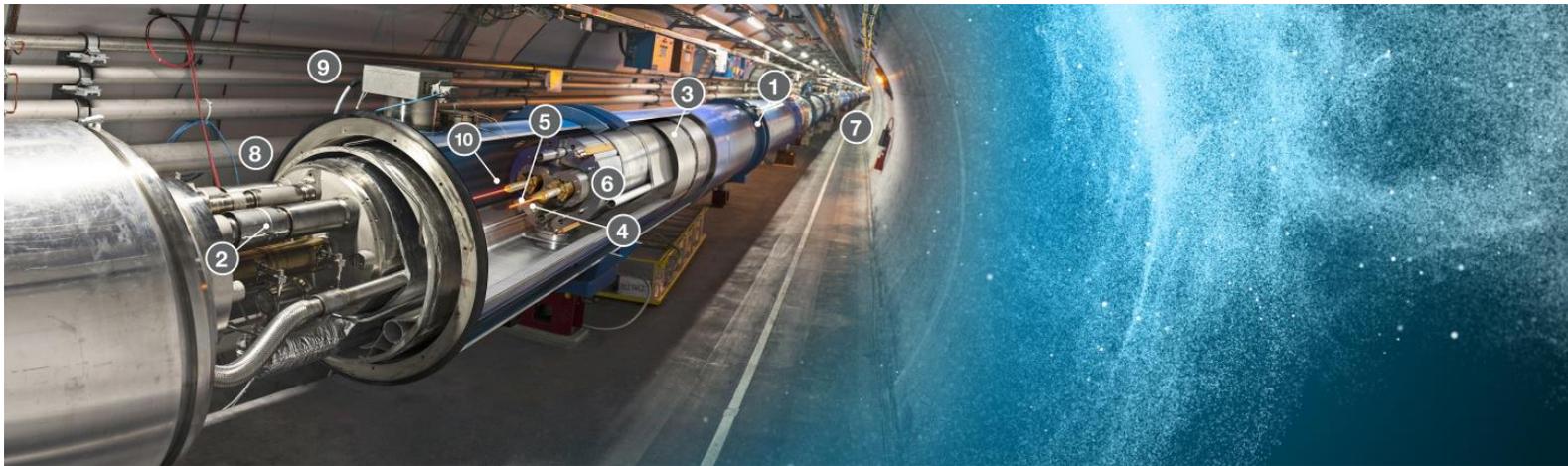
Paulo.Gomes@cern.ch

(& Andre.Rocha@cern.ch)

TE / VSC

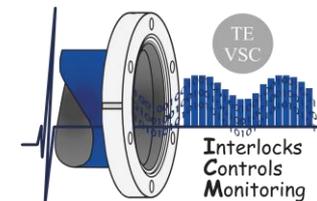
TE – Technology Department

VSC – Vacuum, Surfaces & Coatings Group



Portuguese Language Teachers Program

6 Sep 2022



**os aceleradores do CERN**

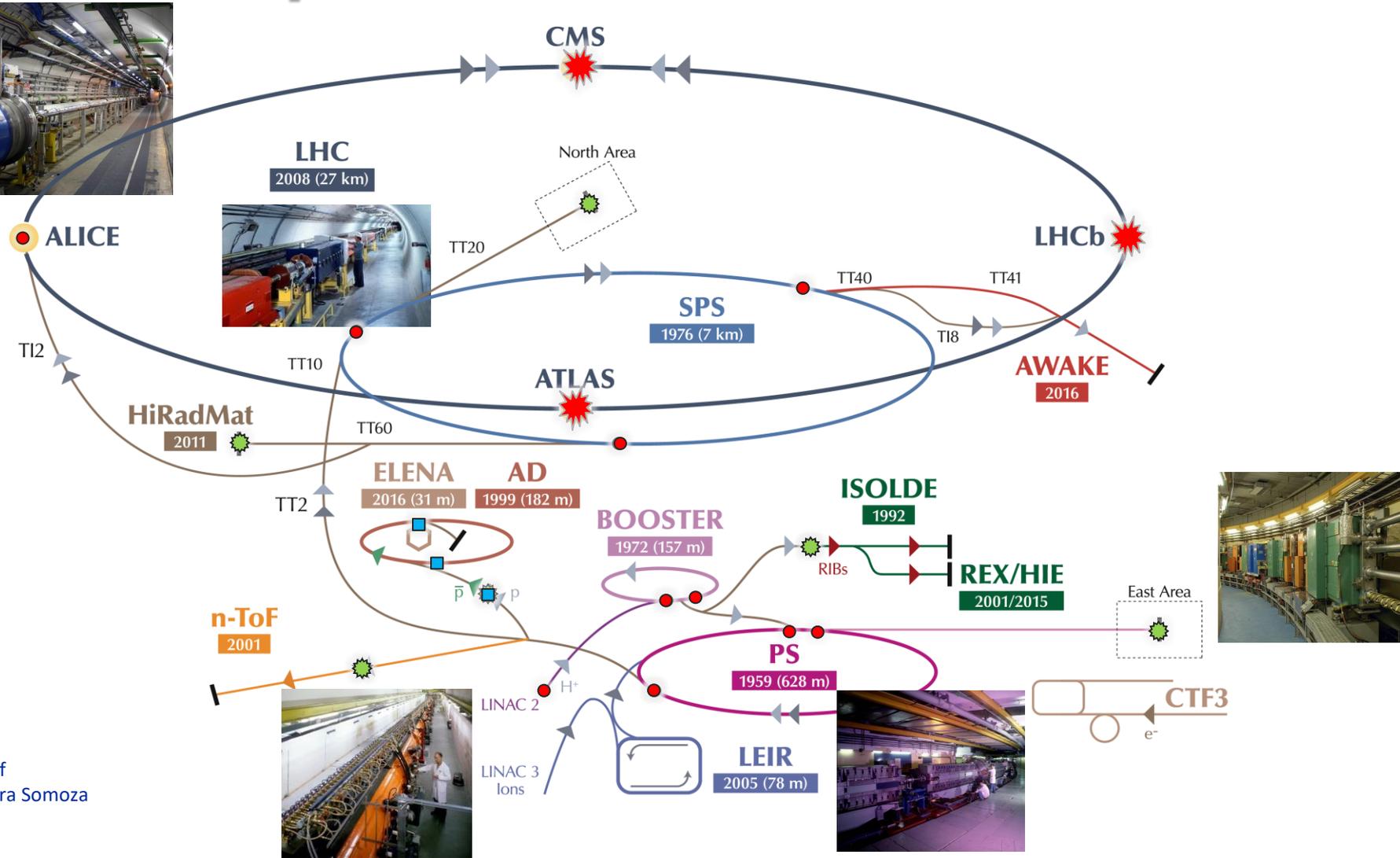
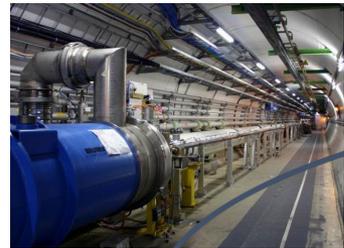
criogenia para quê

vácuo para quê

instrumentos e controladores

arquitectura de controlo

# o Complexo de Aceleradores (prótons)



Courtesy of  
Jose Ferreira Somoza  
(TE-VSC)

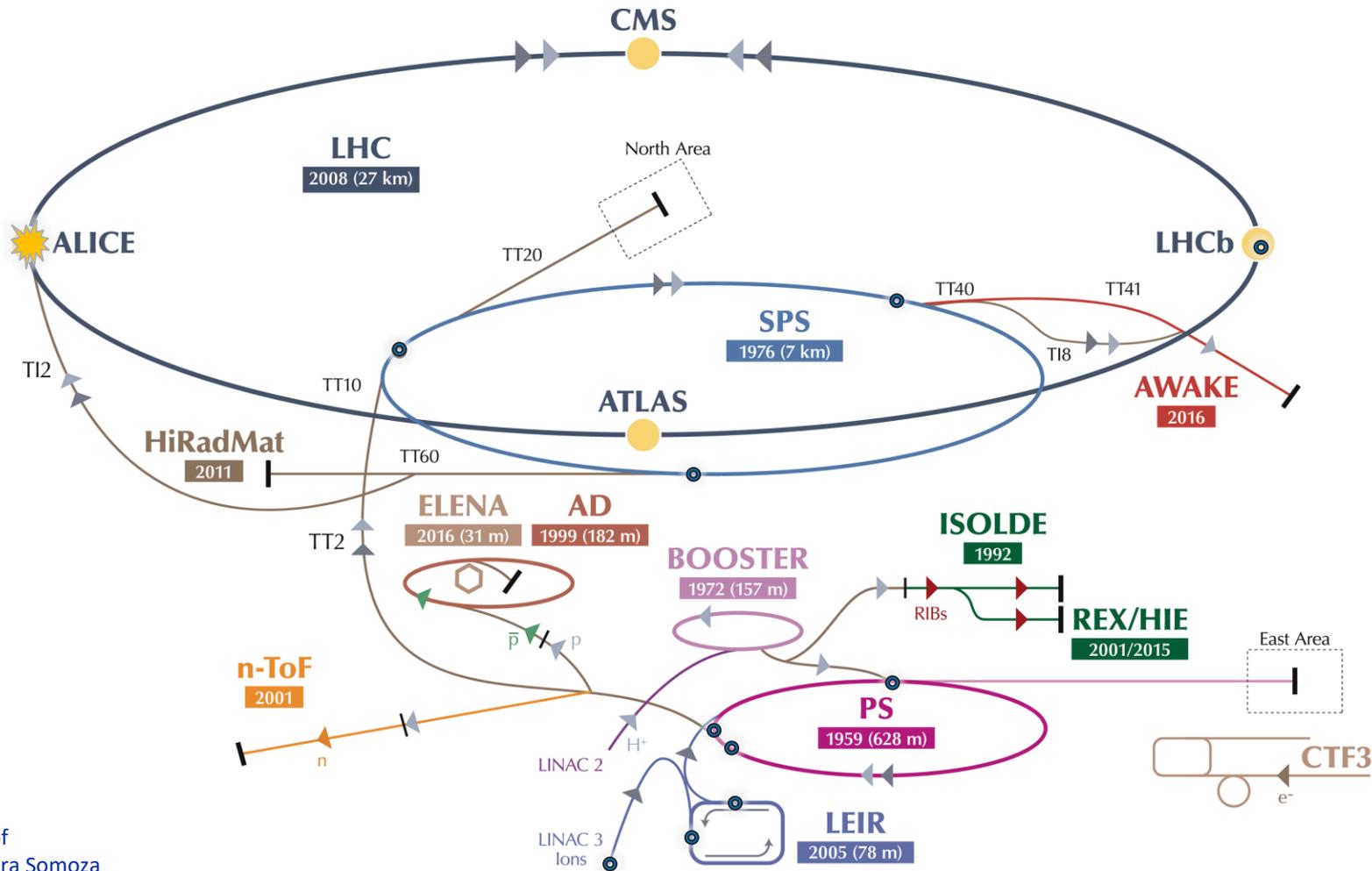
▶ p (protons)
▶ ions
▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
▶ n (neutrons)
▶  $\bar{p}$  (antiprotons)
▶ e<sup>-</sup> (electrons)
▶↔ proton/antiproton conversion
▶↔ proton/RIB conversion

- LHC Large Hadron Collider
- SPS Super Proton Synchrotron
- PS Proton Synchrotron
- AD Antiproton Decelerator
- CTF3 Clic Test Facility
- AWAKE Advanced WAKEfield Experiment
- ISOLDE Isotope Separator OnLine
- REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE
- LEIR Low Energy Ion Ring
- LINAC LINear ACcelerator
- n-ToF Neutrons Time Of Flight
- HiRadMat High-Radiation to Materials

<https://home.web.cern.ch/about>



# o Complexo de Aceleradores (ões)



Courtesy of  
Jose Ferreira Somoza  
(TE-VSC)

▶ p (protons)
▶ ions
▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
▶ n (neutrons)
▶  $\bar{p}$  (antiprotons)
▶  $e^-$  (electrons)
▶  $\leftrightarrow$  proton/antiproton conversion
▶  $\rightarrow$  proton/RIB conversion

LHC Large Hadron Collider
SPS Super Proton Synchrotron
PS Proton Synchrotron
AD Antiproton Decelerator
CTF3 Clic Test Facility

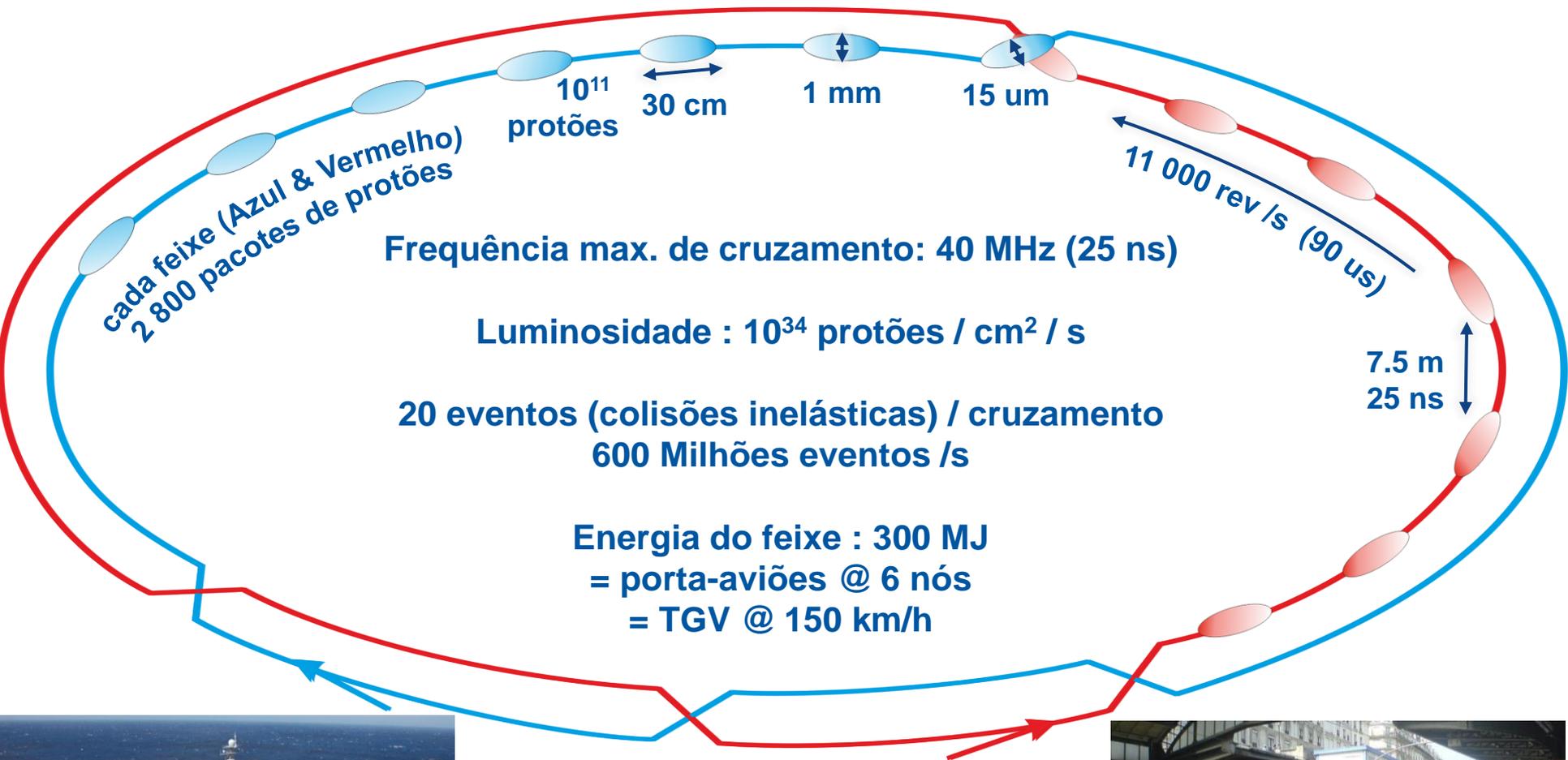
AWAKE Advanced WAKEfield Experiment
ISOLDE Isotope Separator OnLine
REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE

LEIR Low Energy Ion Ring
LINAC LINear ACcelerator
n-ToF Neutrons Time Of Flight
HiRadMat High-Radiation to Materials

<https://home.web.cern.ch/about>



# LHC em números

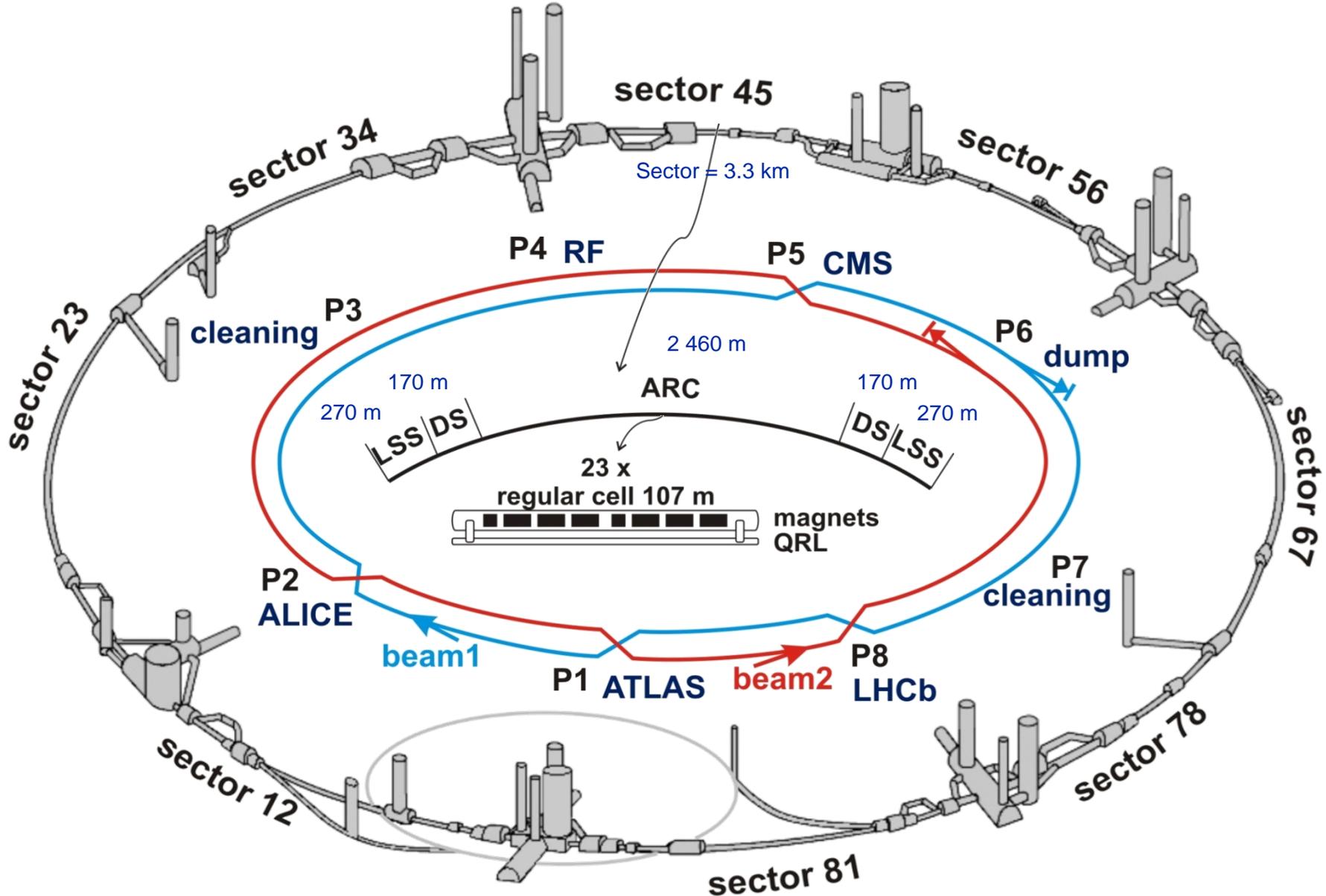


<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/beam.htm>



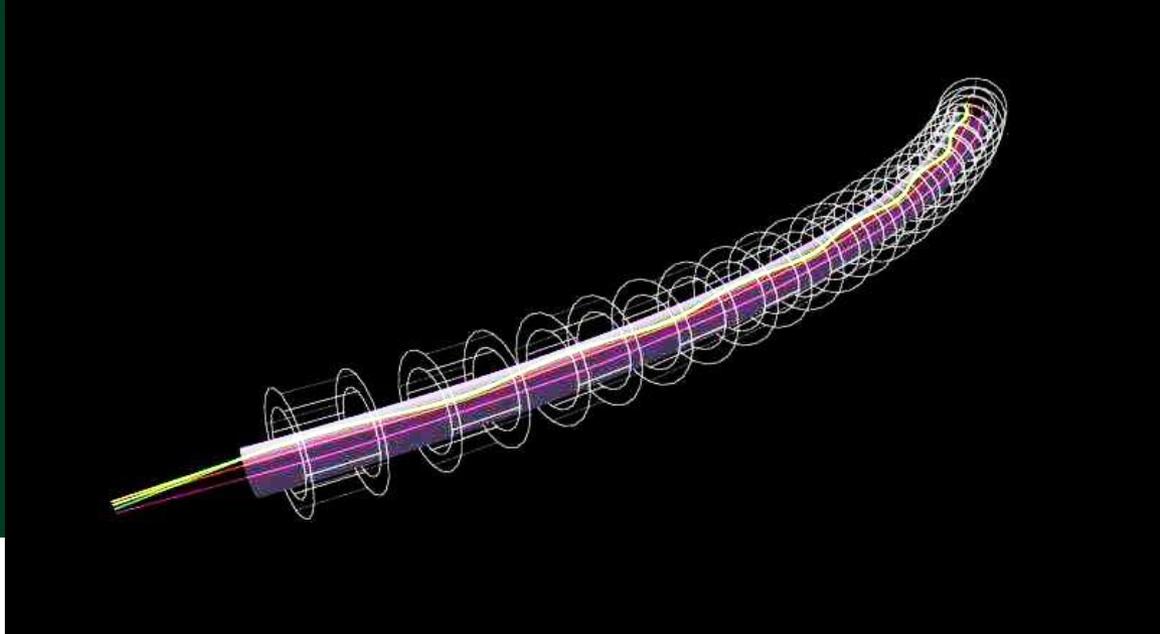
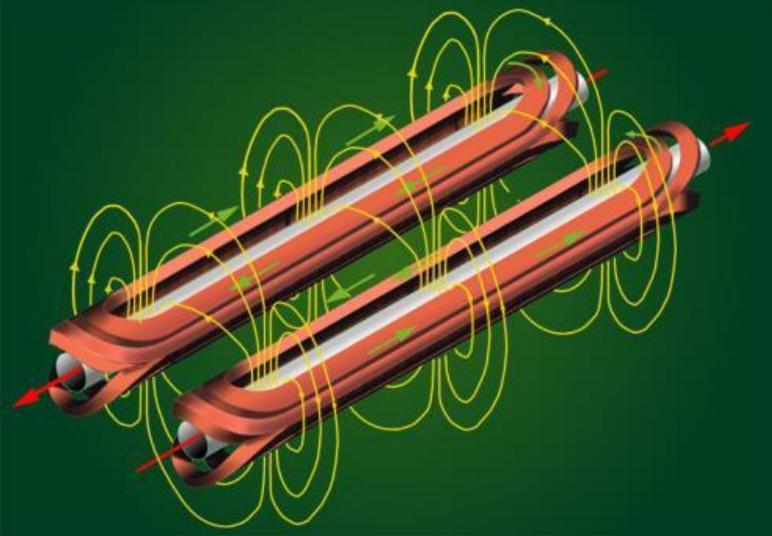
# LHC : colisionador de protões (& iões) : 27 km

## 8 sectores de 3.3 km



os aceleradores do CERN  
**criogenia para quê**  
vácuo para quê  
instrumentos e controladores  
arquitectura de controlo

# guiar o feixe : ímãs supercondutores



**energia dos prótons : 7 TeV**  
**campo magnético dipolos : 8 T**  
**corrente nas bobines : 12 kA**

**super-condutividade necessária**  
**bobinas de tamanho reduzido**  
**zero resistência eléctrica**

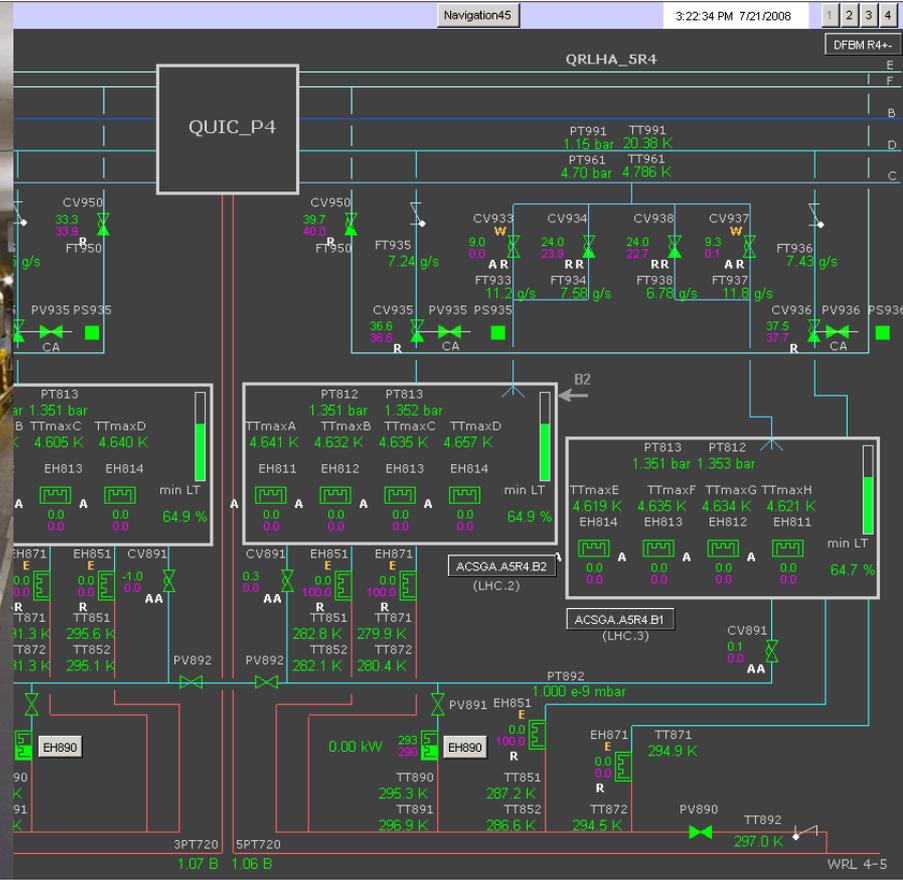
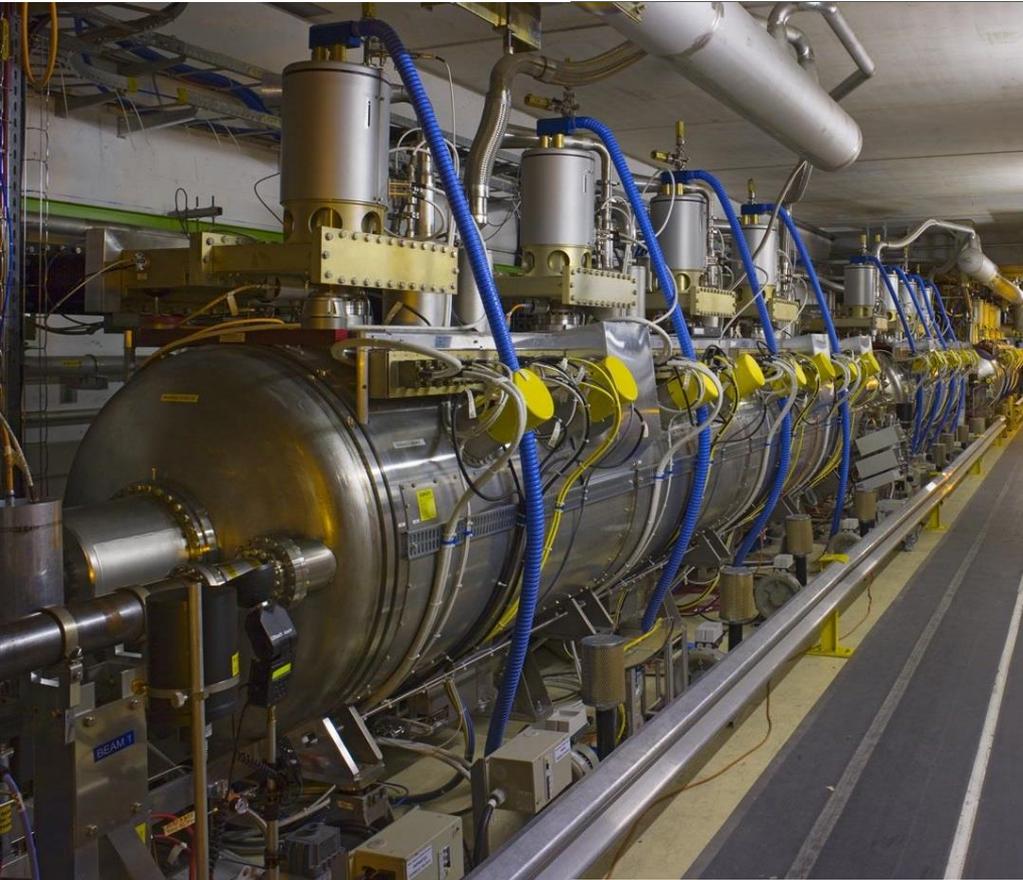
**1200 D + 400 Q + 6 000 Correctr**  
**NbTi @ 1.9 K (= -271 C) (Tc = 10 K)**



<https://home.web.cern.ch/science/engineering/pulling-together-superconducting-electromagnets>

<https://home.web.cern.ch/science/engineering/superconductivity>

# acelerar o feixe : cavidades supercondutoras



**aumentar a energia do feixe: 0.45 → 7 TeV (em 20 min)**

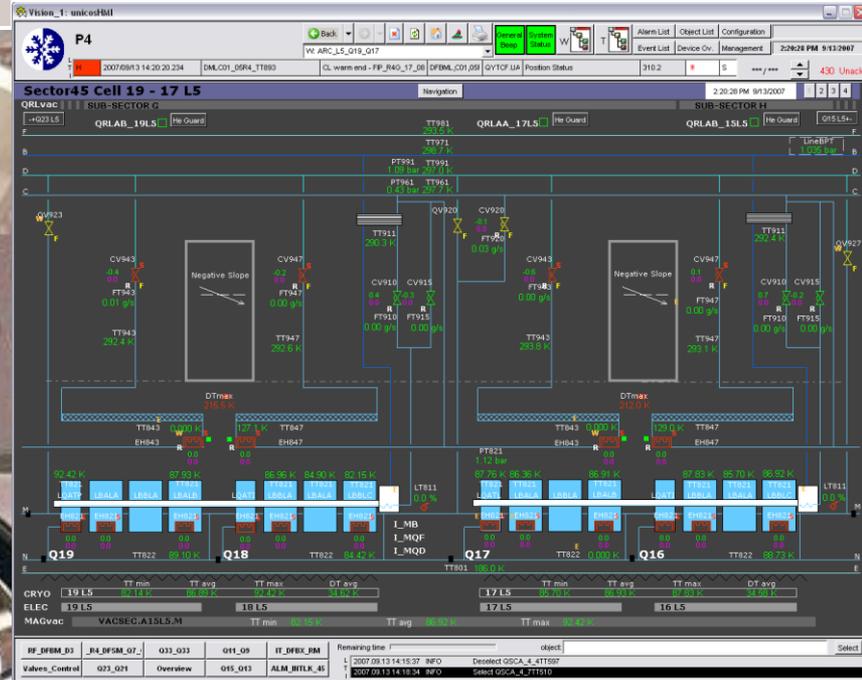
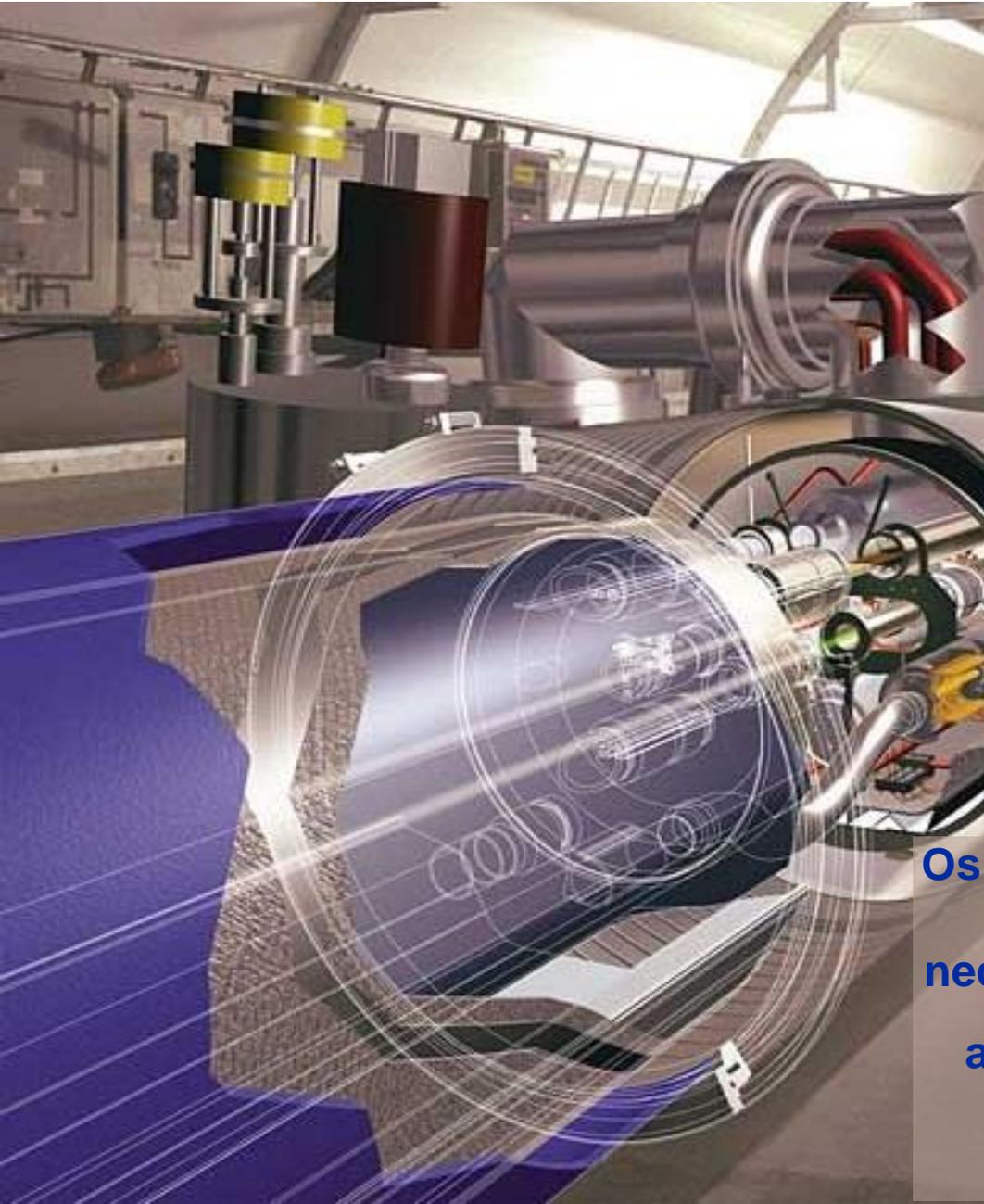
**RadioFrequencia 400 MHz** (ondas electromagnéticas de 2.5 ns)  
espaçamento entre pacotes de prótons = 10 ondas = 25 ns = 7.5 m

**16 cavidades RF @ 4.5 K** (4 grupos de 4, no IP4)

<https://home.web.cern.ch/science/engineering/accelerating-radiofrequency-cavities>

# Criogenia no LHC

<https://home.web.cern.ch/science/engineering/cryogenics-low-temperatures-high-performance>



Os campos electromagnéticos enormes para guiar e acelerar as partículas necessitam materiais super-condutores arrefecidos por hélio @ 1.9 K ou 4.5 K (alta condutividade térmica)

⇒ Criogenia : 15 000 instrumentos

architecture

# CERN Control Centre

**CRYO-SCADA**  
PVSS data server



**CIET**  
PVSS data server



**2 PLC**  
Siemens S7-400  
500 ms cycle



**Ethernet**  
Technical Network

surface - local control room

**8 FEC**  
WorldFIP – Ethernet  
Gateway  
500 ms cycle



100 m  
4x Profibus  
1.5 Mbit/s

100 m  
4x WorldFIP  
1 Mbit/s

alcoves - radiation free

“intelligent”  
**CV positioners**  
with electronics



point-to-point  
cables

**FieldBuses** ← large distances  
**industrial electronics** → protected areas  
**CVs** → electronics moved into protected areas  
**front-end electronics** → radTol custom made

[accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icaleps2009/posters/wep061\\_poster.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icaleps2009/posters/wep061_poster.pdf)  
[accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icaleps2009/papers/wep061.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icaleps2009/papers/wep061.pdf)

180  
**cryogenic CV**  
without electronics



tunnel - radiation

100  
**FIP crates**  
custom rad-tol electronics



sector = 3.3 km



# base de dados

ICALEPCS 2011 poster : <https://cernbox.cern.ch/public.php?service=files&t=8d49fd498d38f9fb0a7824ba93afc09a>  
ICALEPCS 2011 paper : <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalepcs2011/papers/mopkn024.pdf>

17 000  
instrumentation  
channels

800 FIP crates  
900 cards

1 700 Profibus  
components

5 000 cable  
numbers

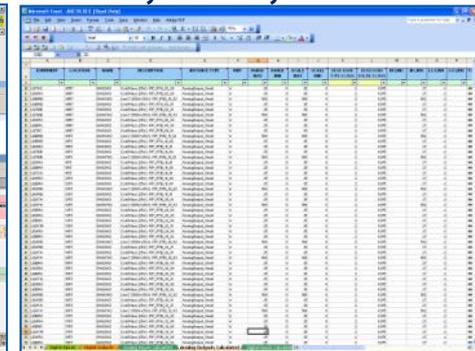
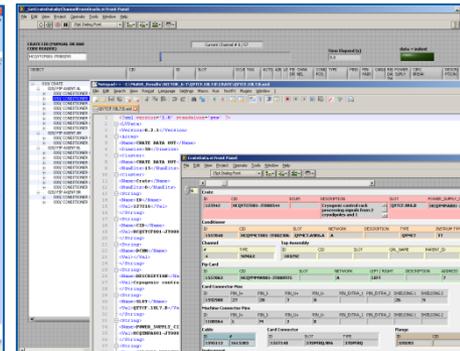
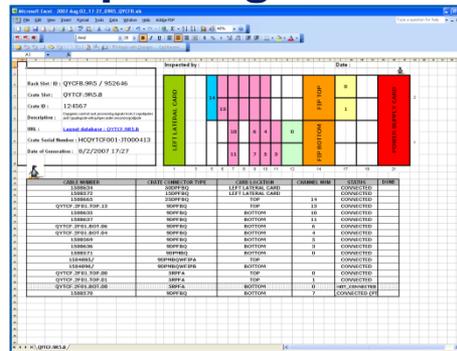
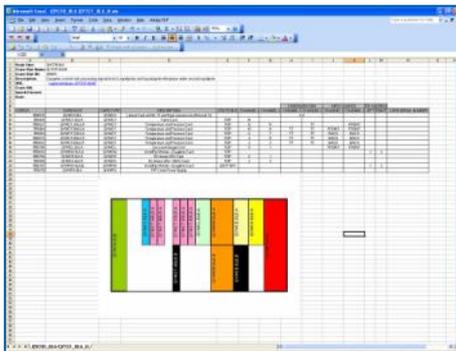
LHC Layout Database

specification files  
for manufacturing  
FIP Crates

cabling files for  
connecting &  
inspecting cables

XML files for  
Mobile Test Bench

specifications for  
control software  
PLC , FEC, SCADA





pessoal do frio



os aceleradores do CERN  
criogenia para quê  
**vácuo para quê**  
instrumentos e controladores  
arquitectura de controlo

# Vácuo : isolamento térmico para a Criogenia

Para isolar as temperaturas extremamente baixas (cavidades RF, ímans, linhas de distribuição de helio)

a criogenia necessita de vácuo ( podemos começar a arrefecer quando o vácuo atinge a  $10^{-1}$  mbar )

Abaixo de 20 K (-250 C), o frio dos metais é suficiente para manter o vácuo a  $10^{-7}$  mbar



# Vácuo : deixem passar as partículas

LINAC\_2: 50 MeV



PS\_Booster: 1.4 GeV



PS: 26 GeV



SPS: 450 GeV



Em qualquer acelerador, o vácuo é necessário para :  
reduzir as colisões entre as partículas aceleradas e as moléculas do ar  
maximizar a duração do feixe ( $100\text{h} : 10^{-8}$  mbar)

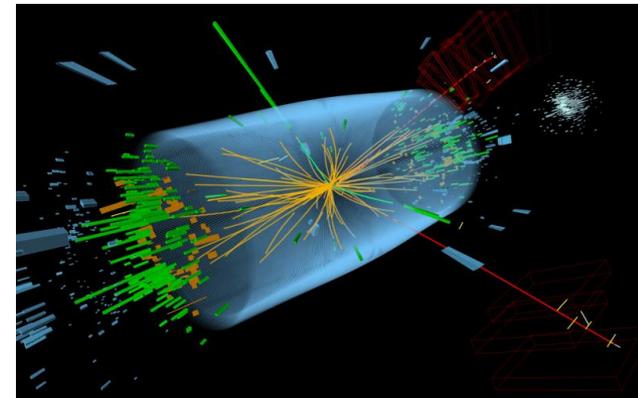


LHC: 7 000 GeV

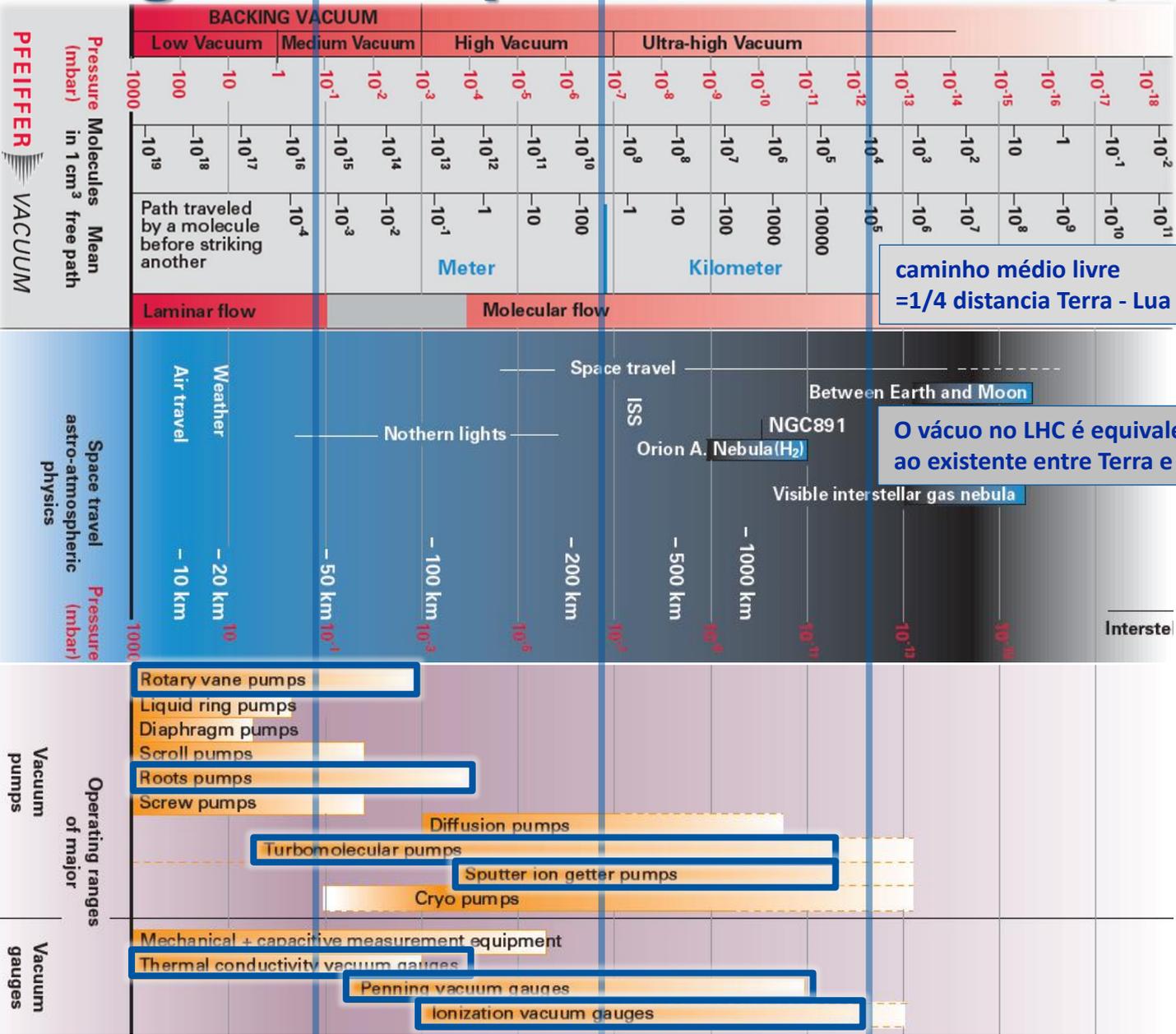


minimizar o ruído de fundo para as experiências ( $10^{-11}$  mbar)

<https://home.web.cern.ch/science/engineering/vacuum-empty-interstellar-space>



# gamas de pressão de vácuo (15 décadas)



**LHC Insulation Vacuum**  
 $P < 10^{-1}$  mbar  
 VAC\_OK for cool-down

@T < 20 K : cryo-pumping  
 $P \sim 10^{-7}$  mbar

**Beam Vacuum**  
 $P \sim 10^{-9} \dots 10^{-12}$  mbar

**caminho médio livre = 1/4 distancia Terra - Lua**

**O vácuo no LHC é equivalente ao existente entre Terra e Lua**



**primary /roughing pumps**  
 $10^{+3} \dots 10^{-2}$  mbar

**turbomolecular pumps**  
 $\dots 10^{-11}$  mbar

**sputter ion pumps**  
 $10^{-5} \dots 10^{-11}$  mbar

**pirani gauges**  
 $10^{+3} \dots 10^{-4}$  mbar

**Penning gauges**  
 $10^{-5} \dots 10^{-11}$  mbar

**Bayard-Alpert gauges**  
 $10^{-5} \dots 10^{-12}$  mbar



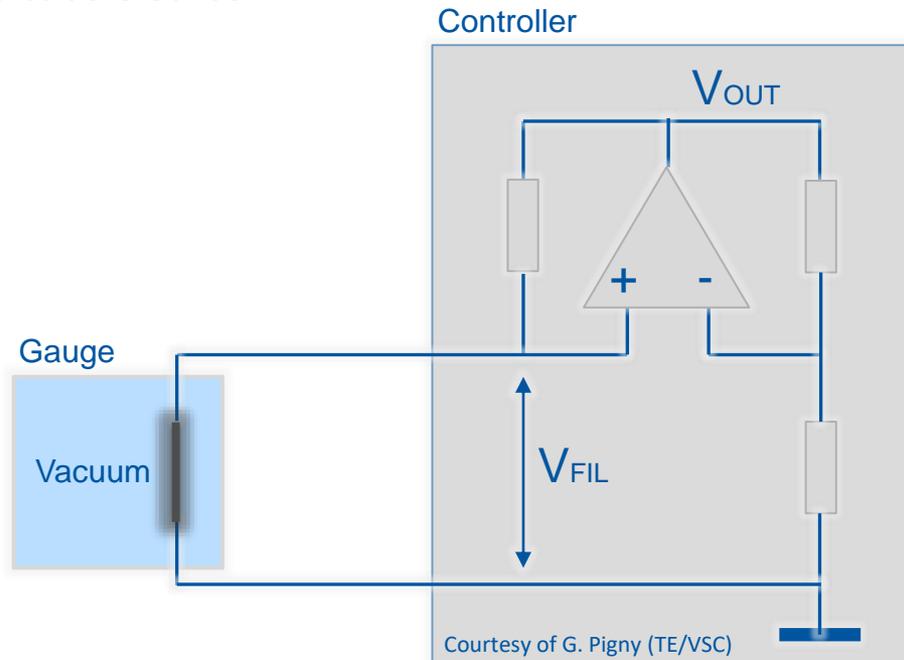
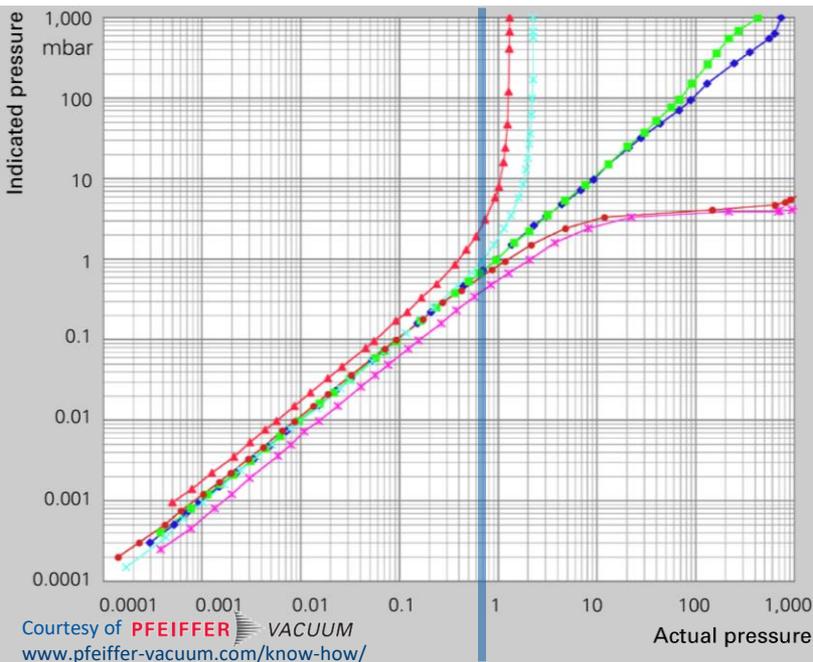
os aceleradores do CERN  
criogenia para quê  
vácuo para quê  
**instrumentos e controladores**  
arquitectura de controlo

# sensores Pirani (thermal conductivity)

1 bar ..  $10^{-4}$  mbar

A condutividade térmica de um gas depende da sua pressão  
 Uma resistência eléctrica é aquecida a temperature constante ( $\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ )  
 A corrente eléctrica necessária para manter essa temperatura  
 é proporcional à pressão do gás  
 ( maior pressão = maior condutividade = maior dissipação )

Acima de 1mbar deixa de ser linear e depende do tipo de gas  
 Precisão  $\sim 30\%$   
 Necesita calibração para compensar comprimento do cabo elétrico  
 Sensível à temperatura ambiente



# sensores Penning (cold cathode ionization)

$10^{-5} .. 10^{-11}$  mbar

Elétrões são emitidos do cátodo graças a campo elétrico de 3 kV

Um campo magnético ( 0.1 T ) faz com que os elétrões percorram uma longa espiral até chegarem ao ânodo, aumentando assim a probabilidade de chocar e ionizar moléculas de gás

As moléculas de gás ionizadas são atraídas para o cátodo e a corrente gerada é uma medida da pressão (entre 1uA e 1pA)

Precisão ~ 50%

Pressão elevada : corrente instável (produção de arco eléctrico)

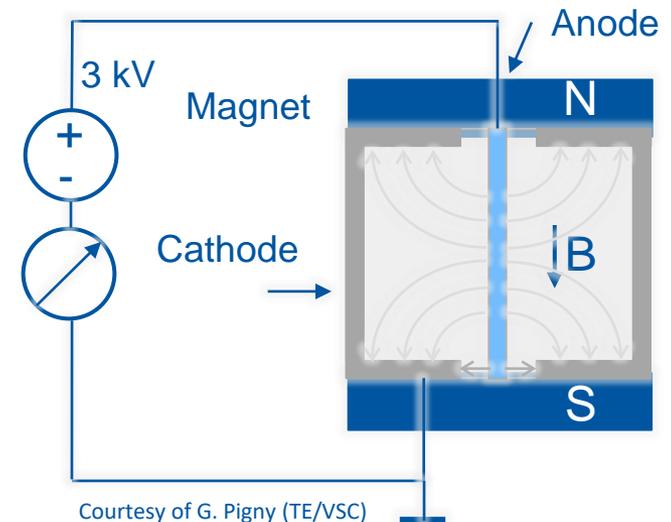
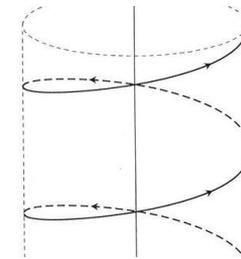
Pressão baixa : corrente extingue-se (leitura zero)

Cabo interrompido = leitura zero

= indicação errada de baixa pressão

Mau isolamento da alta tensão = corrente de fuga

= indicação errada de alta pressão



# sensores Bayard-Alpert (hot cathode ionization)

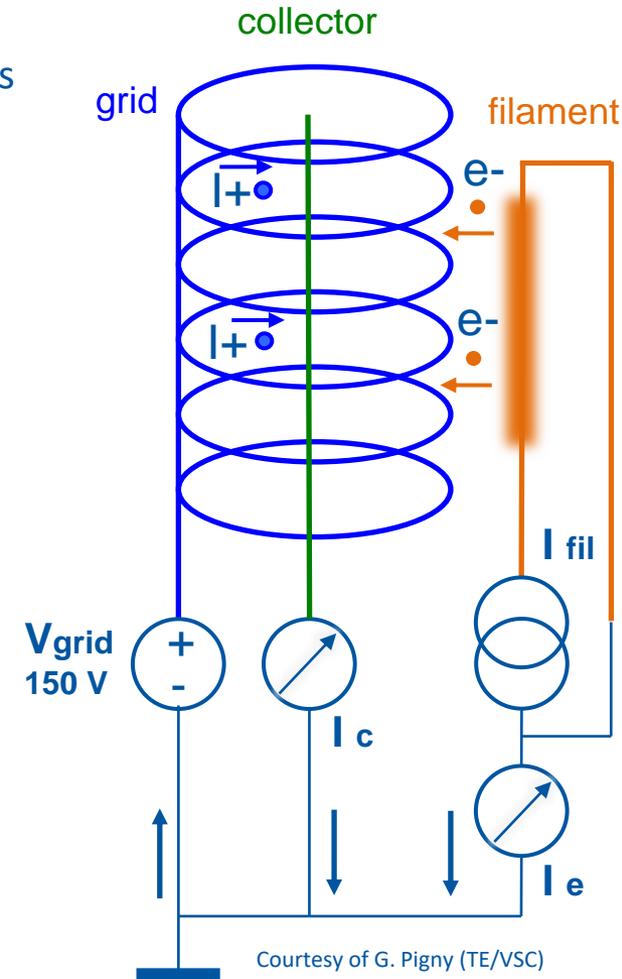
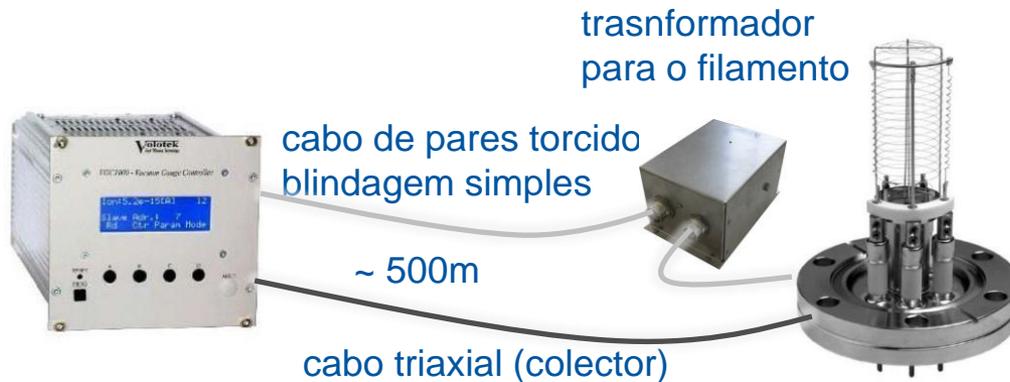
$10^{-5} .. 10^{-12}$  mbar

Elétrões são emitidos pelo filamento aquecido (não necessitando campo elétrico elevado)  
Campo elétrico (150 V) dentro da grelha cilíndrica faz com que os electrões percorram longo caminho,  
aumentando assim a probabilidade de chocar e ionizar moléculas de gás

As moléculas de gás ionizadas são atraídas para o colector  
e a corrente gerada é uma medida da pressão (entre 1uA e 0.1pA)

Precisão ~ 10%

Necessita calibração



# Bombas primárias

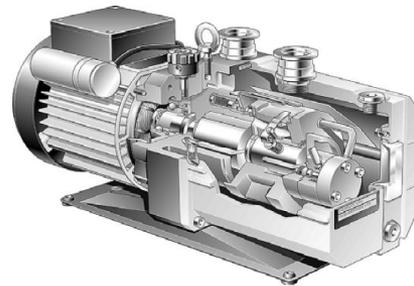
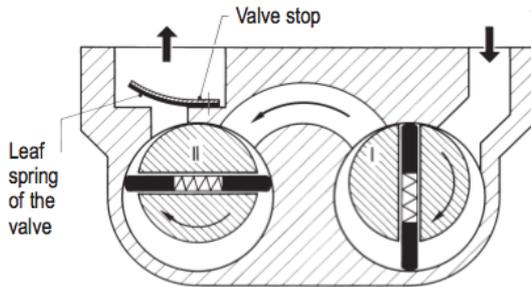
1 bar ..  $10^{-2}$  /  $10^{-4}$  mbar

Velocidade de bombagem : alguns  $m^3/h$

Utilizadas para bombear a partir da pressão atmosférica  
ou como auxiliares de bombas turbo-moleculares

Bombas húmidas (ex. **Rotary vane**)

usam óleo para vedar, lubrificar e refrigerar

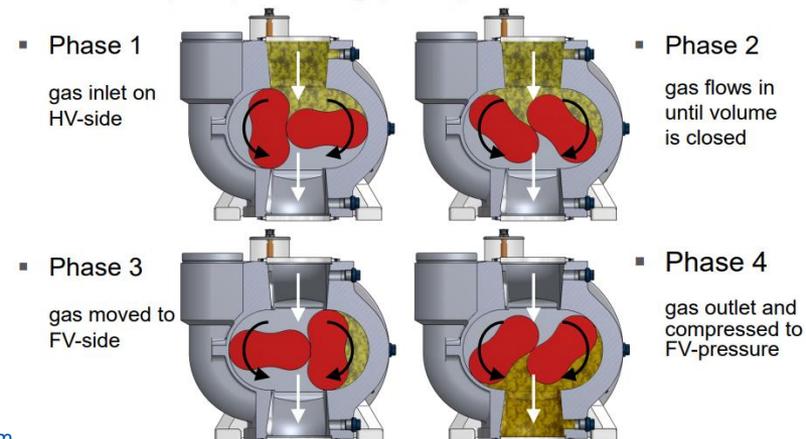


I High vacuum stage  
II Second forevacuum stage

Courtesy of Oerlikon-Leybold  
<http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/en/documents/download-documents/>

Bombas secas (ex. **Roots**)

são mais ecológicas  
necessitam de grande precisão mecânica



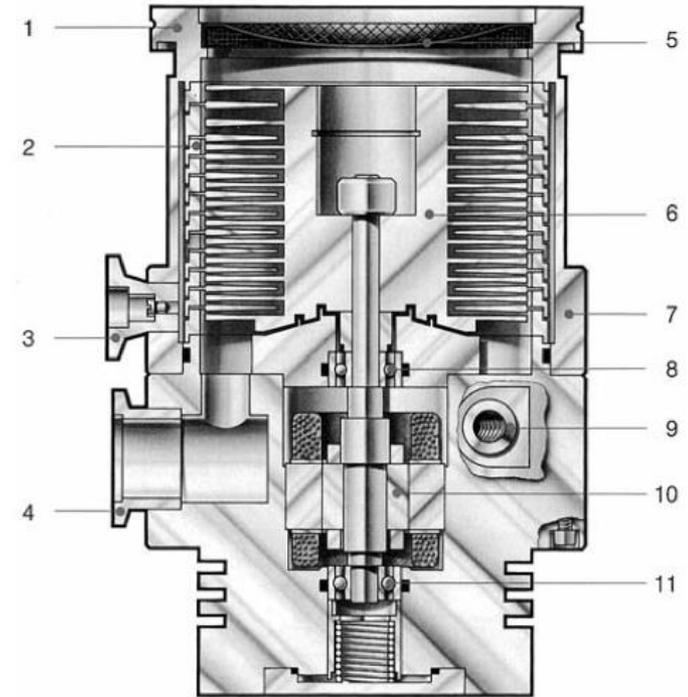
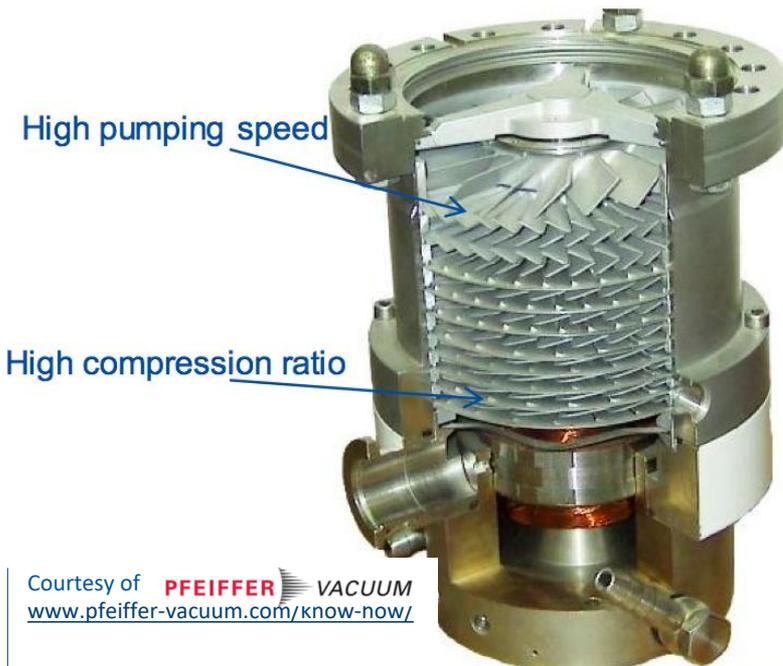
# Bombas Turbo-Moleculares

$10^{-2} \dots 10^{-11}$  mbar

Velocidade de bombagem : 10 .. 3 000 l/s

O movimento rápido do rotor (30 000 - 70 000 rpm)  
empurra as moléculas em direção à saída de escape

É utilizada juntamente com uma bomba primária



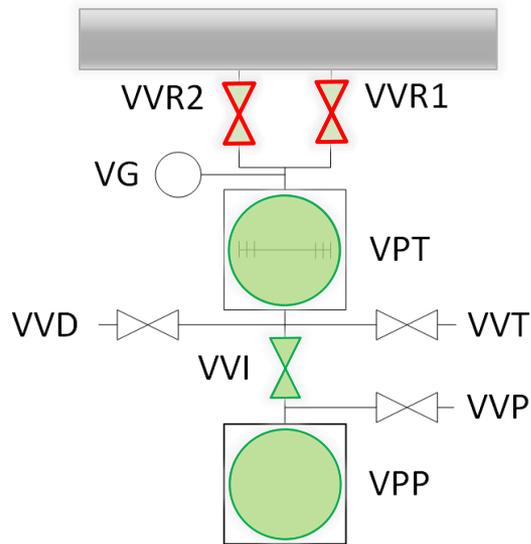
- |                            |                  |                            |
|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 1 High vacuum inlet flange | 5 Splinter guard | 9 Cooling water connection |
| 2 Stator pack              | 6 Rotor          | 10 3-phase motor           |
| 3 Venting flange           | 7 Pump casing    | 11 Ball bearings           |
| 4 Forevacuum flange        | 8 Ball bearings  |                            |

Courtesy of Oerlikon-Leybold  
<http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/en/documents/download-documents/>

# Grupos de bombagem

Um grupo de bombagem é formado por uma bomba primária (VPP) e uma turbo-molecular (VPT)  
Sequência de funcionamento:

1. Ligar bomba primária
2. Abrir válvula intermédia (VVI)
3. Esperar até que se obtenha baixa pressão na turbo
4. Ligar a bomba turbo molecular
5. Esperar que a bomba turbo molecular atinja a velocidade nominal
6. Abrir válvulas VVR1 e VVR2



Válvulas:

VVT – Venting bomba Turbo Molécula

VVP – Venting bomba Primária

VVD – Detecção de fugas

VVR1 e VVR2 – Ligam o grupo à câmara de vácuo

# Bombas iónicas

$10^{-5} \dots 10^{-11}$  mbar

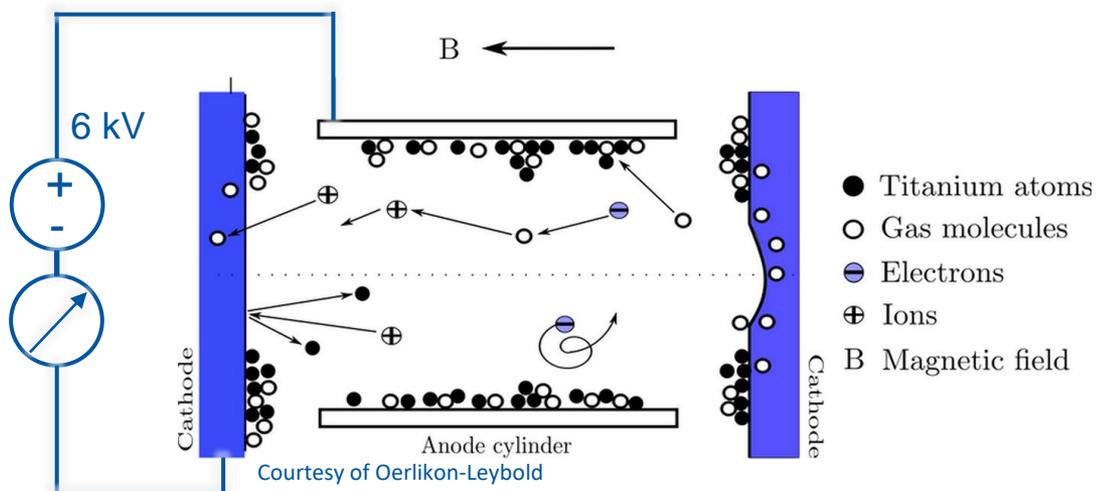
Mesmo princípio de sensores Penning - Várias células Penning em paralelo

Elétrões presos na célula devido a combinação entre campo elétrico e campo magnético

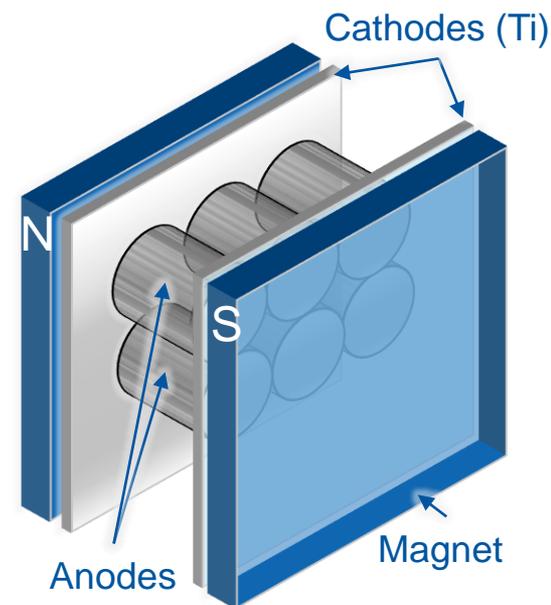
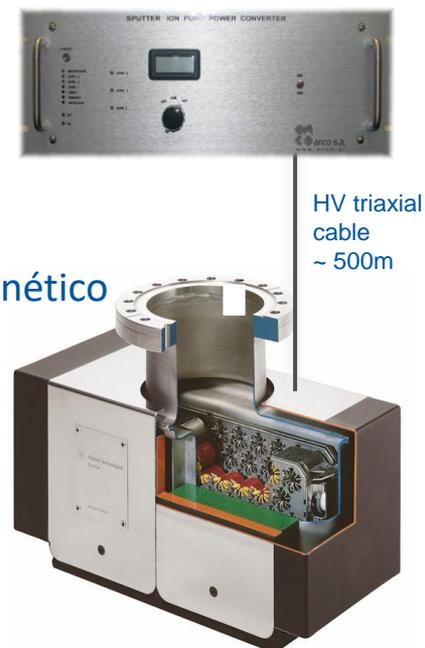
Elétrões ionizam o gás e os iões são atraídos para o cátodo

Ao colidirem com o cátodo, Ti é libertado e forma uma camada no ânodo que prende gases (adsorption)

Volume bombado é retido dentro da bomba – sem escape



Courtesy of Oerlikon-Leybold  
<http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/en/documents/download-documents/>



# Sectorização

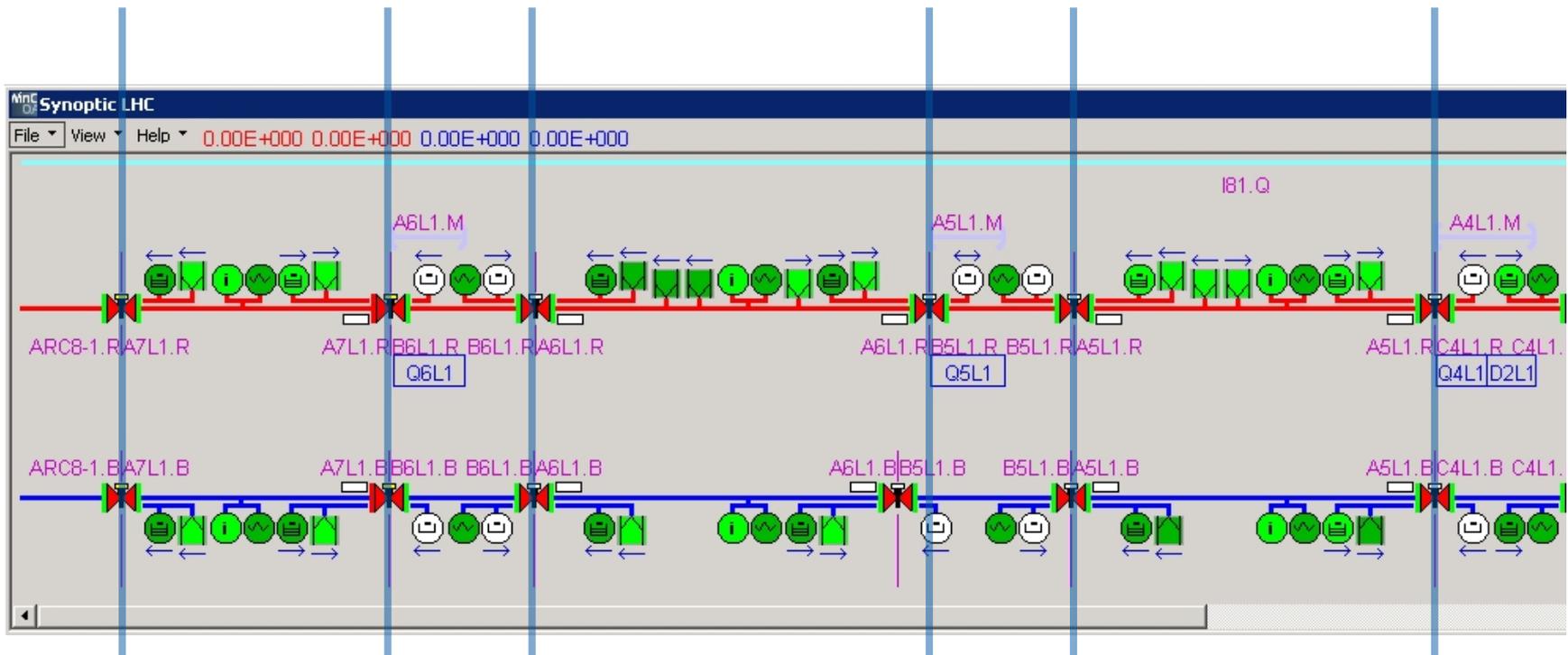
A instalação de vácuo está dividida em sectores (sectorizada) para:

- Isolar fugas

- Permitir intervenções sem afetar outros sectores

- Reduzir o tempo de bombagem após intervenções

A separação entre os sectores é feita através de válvulas de sector



# quantos instrumentos ?

Mais de **6 000** instrumentos a serem monitorizados e controlados remotamente

**130 km** de câmaras de vácuo

Pressão de operação :  $10^{-4}$  ..  $10^{-12}$  mbar

Autómatos programáveis (PLCs) : **300**

Sensores de pressão : **3 000**

Grupos de bombagem : **250**

Bombas de ionização : **2 700**

Válvulas de Sector : **500**

	L2,L3, PSB,PS	SPS	LHC beam	LHC insul.	other facilities	total
length [km]	2	16	59	50	1	128
log (P [mb])	-7..-10	-7..-9	-8..-11	-5..-7	-4..-10	-4..-11
PLC master	5	8	28		3	44
PLC other	0	10	7		0	17
PLC slave	0	0	100		155	255
<b>VGM</b>	0	0	10	231	0	241
<b>VGR</b>	102	113	428	348	61	1052
<b>VGP</b>	122	128	649	364	66	1329
<b>VGF</b>	0	13	4	0	0	17
<b>VGI</b>	28	0	167	0	16	211
<b>VPGF</b>	7	3	14	179	51	254
<b>VPI</b>	370	1429	825	0	69	2693
<b>VPS</b>	48	0	0	0	0	48
<b>VVS</b>	76	87	305	39	13	520
<b>VVF</b>	0	11	0	0	0	11
<b>VVW</b>	0	5	0	0	0	5

os aceleradores do CERN  
criogenia para quê  
vácuo para quê  
instrumentos e controladores  
**arquitectura de controlo**

# a sala de controlo

1974

Sala de control do PS (Proton Synchrotron)

©CERN



2015

Sala de control do LHC e seus injectores  
CERN control centre (CCC)

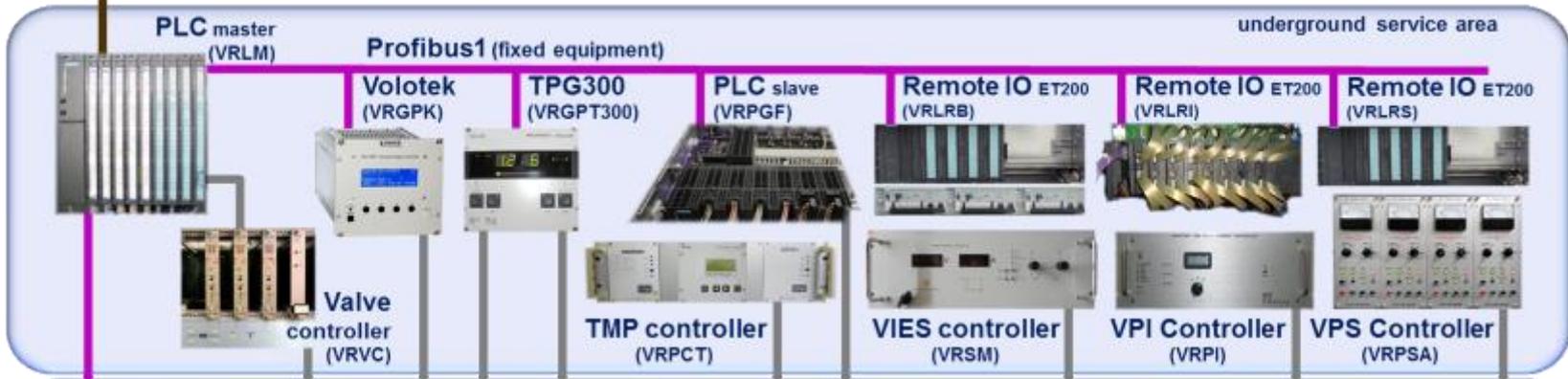
©CERN

# arquitectura de control para o vácuo

Supervision layer



Control layer



Field layer



accelerator tunnel

ICALEPCS 2011 poster : [http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalepcs2011/posters/mopms016\\_poster.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalepcs2011/posters/mopms016_poster.pdf)  
 ICALEPCS 2011 paper : <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalepcs2011/papers/mopms016.pdf>



# Camada de campo no túnel do acelerador

Equipamentos diretamente ligados ao processo de vácuo:

- Sensores de pressão
- Bombas
- Grupos de bombagem
- Válvulas de sector
- Etc..

Field  
layer



# Camada de controlo nas zonas de serviço subterrâneas

Controladores de dispositivos da camada de campo

Interpretam dados analógicos de sensores e bombas e transmitem valores para PLCs

Atuam nos sensores e bombas

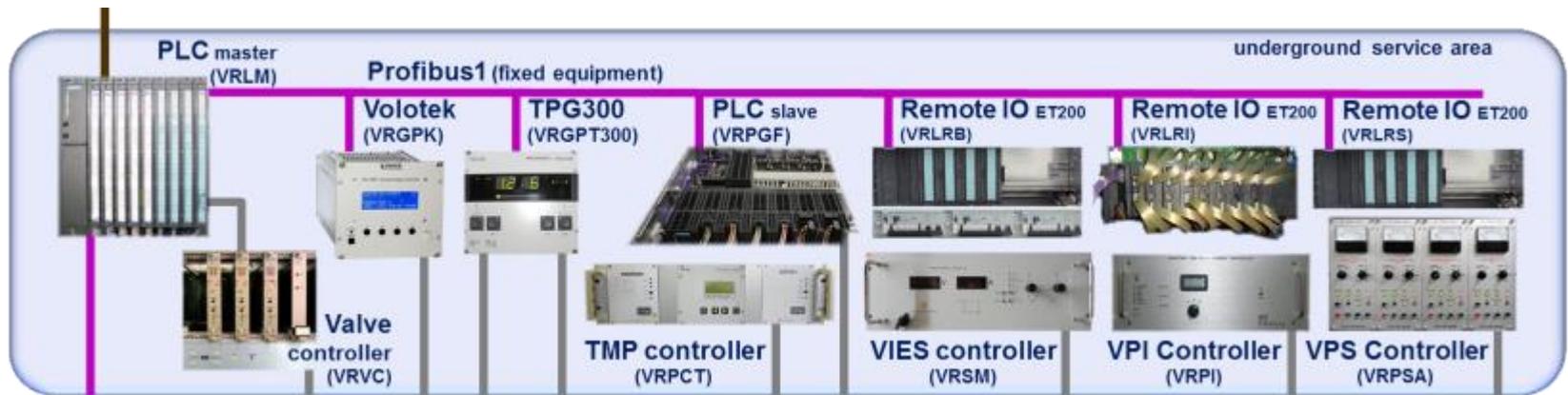
PLCs – Programmable Logic Controller – Computadores Industriais

Recebem informação dos controladores de equipamento

Enviam informação para a camada de supervisão

Transmitem comandos da camada de supervisão para controladores

Control  
layer



# Camada de supervisão na superfície



**SCADA** – Supervisory Control And Data Acquisition

É o software que permite aos operadores interagirem com o sistema de controlo e também analisar o passado

Comunica em tempo real com a electrónica de controlo e com os PLCs

Representa os processos de vácuo a partir de interfaces gráficas para que operadores possam:

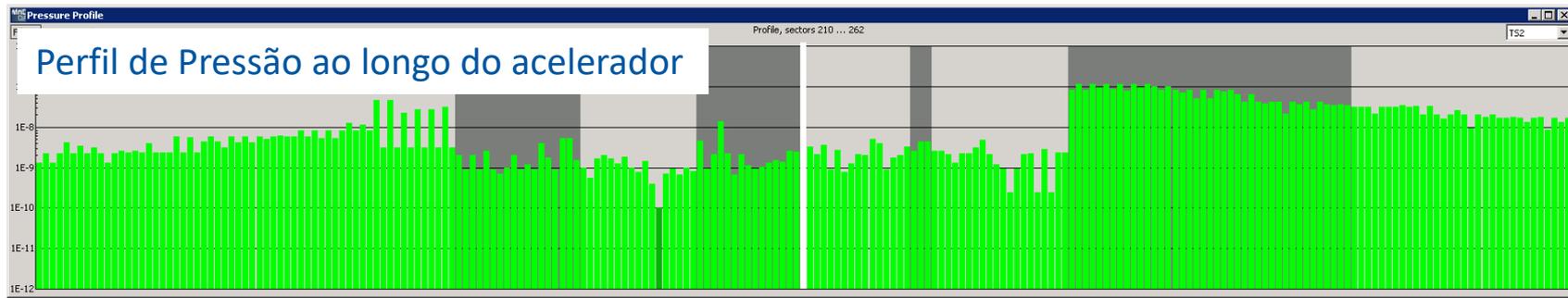
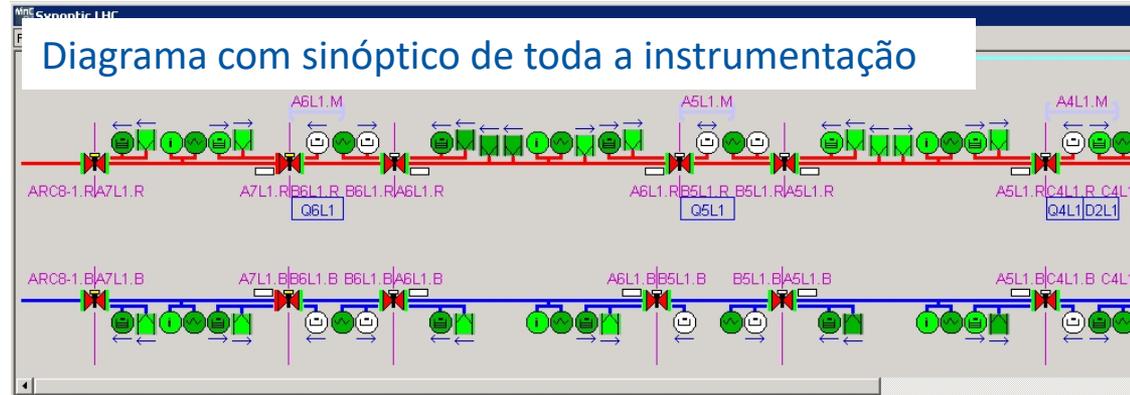
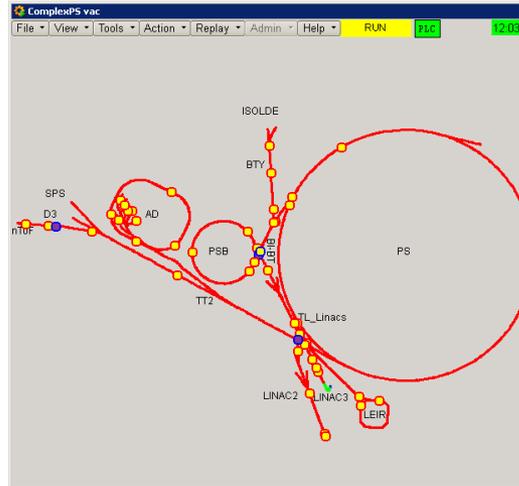
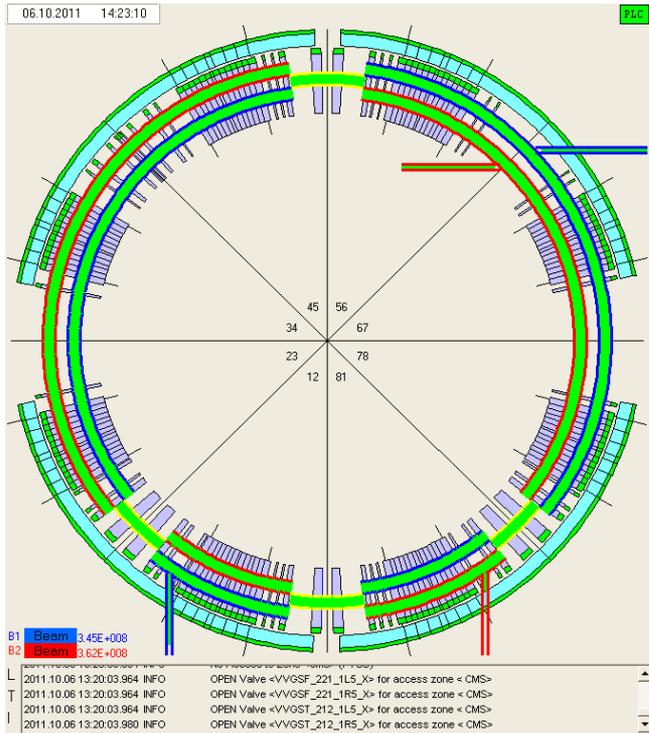
- Verificar o funcionamento do equipamento de vácuo
- Serem alertados em caso de anomalias
- Interagir com dispositivos

Arquivo de dados históricos:

- Permite visualizar e analisar a evolução temporal

# Funcionalidades do SCADA - vistas

## Vista principal de cada Acelerador



# Funcionalidades do SCADA - listas

## Lista de equipamentos

The 'Device List' window displays a tree view of sectors on the left and a table of equipment types on the right. The table has columns for 'Eq Type', 'Amount', and 'Use'.

Eq Type	Amount	Use
1 Valves	14	YES
2 Pirani gauges	17	
3 Penning gauges	17	
4 Ion pumps	211	
5 External interlock/alarm target	3	

## Alarmes por SMS

The 'Generic SMS Configurations' window shows a table of alarm configurations. The current machine mode is 'SHUTDOWN'.

ID	Owner	Group	Configuration	Error	State	Events	messag
16225	Imourier		Cryo alarms no filtered		Inactive	0	3
16227	Imourier		Cryo alarm		Running	122	122
16228	dcalegar		Pumping groupe LHCb BO		Inactive	0	2
16229	dcalegar		BO rack LHCb BO		Inactive	0	5
16231	gbreglio		Pumping Group Bakeout		Running	3	3
16234	gbreglio		Bake-out A6L7		Running	6	6
16235	Imourier		P> 1E-2		Running	261	266
16236	Imourier		VGP OFF or pressure is increasing		Inactive	898	582
16240	Imourier		WVR not open?		Inactive	52	52
16241	Imourier		PLC status		Running	1165	1257
16864	dcalegar		Vannes GIS et IP2		Running	168	168
16865	lkopylov		PLC is dead		Running	465	465
16866	sblancha		YPG6A Stop		Inactive	1808	333
16867	fbellori		Gas Injection Trbls		Running	54	56
16872	jsestak		C4R8 Bake-out rack WARNING		Inactive	0	30
16873	jsestak		C4R8 Bake-out rack ERROR		Inactive	0	12
16874	jsestak		C4R8 Pumping group WVR CLOSED		Inactive	0	2
17590	jdclagam		Valves_LHC		Inactive	3560	1848

## Acções globais

The 'Global Action: Group Action' dialog box shows a list of sectors selected (10 sectors) and a table of equipment types. The 'Action' field is set to 'Switch ON all Penning Gauges'.

Equipment	Eq. Type	Amount
VGP_T		53
VGR_T		34
VPG_6AD1		1
VPI		155
VPS		113
VVS_PS		13



# Funcionalidades do SCADA - histórico

## Histórico de estados

State\_History: StateArchiveDetails

From: 01-02-2016 15:05:22 To: 02-03-2017 15:05:22

Show Print... Save...  Show controller names

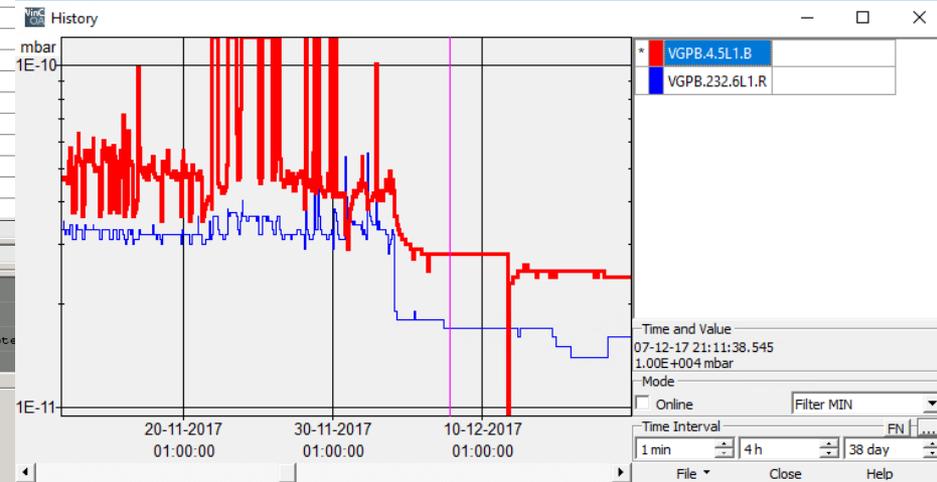
VGPB.4.6L5.R	
01-03-2017 10:47:39	ON
01-03-2017 10:47:41	ON
01-03-2017 10:53:23	OFF
01-03-2017 10:53:58	ON
01-03-2017 11:48:42	OFF
01-03-2017 12:02:54	OFF
01-03-2017 12:02:56	ON
01-03-2017 12:03:14	ON
01-03-2017 15:30:07	ON
01-03-2017 15:30:09	ON
01-03-2017 15:30:14	ON
01-03-2017 18:31:41	ON

VGPB.4.6L5.R Error: Warning:

LOCKED	VALIDITY	REMOTE	Auto	ON
ERRORS	WARNINGS		Protected	PR Valid ON OFF
0<Error Code<3	Pres High	OFF	No action W3	Overrange Underrange Self Prote

Close Help

## Histórico de pressões



## Replay

ReplayModule: Replay Control

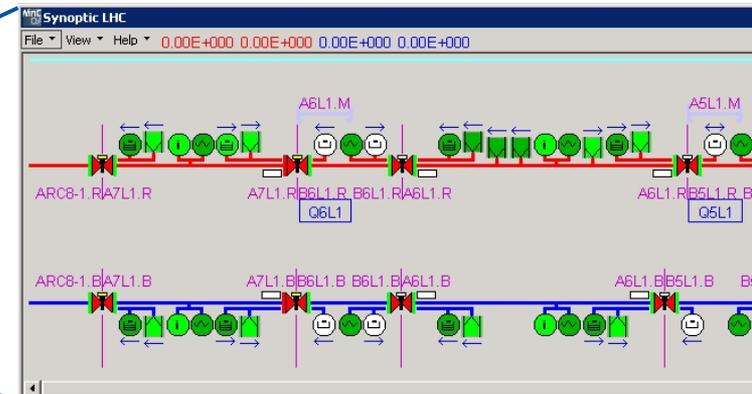
28-02-2017 02-03-2017

Start time 02-03-2017 11:50:29 359 Duration 0 days 1 hours

Play Mode Time Driven Display data every 1 min 0 sec

2017.03.02 12:50:29.000

Close Help



# Arquivo histórico

2 anos de arquivo histórico de vácuo estão disponíveis no SCADA

Aquisição de dados para todos os equipamentos 1 Hz

Não se pode guardar tudo:

- O armazenamento de dados é limitado

- O tempo de acesso aos dados aumenta com a quantidade de dados

- Não interessa guardar ruído

Valores **Analógicos** (Pressões, correntes, temperaturas)

- São sujeitos a filtro (deadband)

- Filtro pode ser configurado individualmente por equipamento

- Filtro pode ser ajustável automaticamente para limitar os equipamentos mais ruidosos

Valores **Digitais** (Estado de dispositivos, Código de erro, Código de aviso, Alarmes)

- Todos os valores são interessantes !

- São guardados sem filtragem

# Technical recommendations for control systems

Quality of connectors, grounding and cables are essential for reliable **measurements**

For **low current measurement** (pA, fA), several external factors can strongly affect the results

**Interlocks and alarms** must be reliable and tested extensively to assure the machine protection

Electronics shall be tested under **radiation** before to be installed in radiation areas

**Wireless** network can be used with mobile equipment to improve time intervention and cost

Choose your SCADA **software** carefully

If your control system is moderately large – **automate** configuration

Distribute your applications between **servers** wisely

Protect your control system by having your SCADA on a dedicated, **secured network**

# Conclusão

O LHC é precedido por uma cadeia de aceleradores de dimensões e energia crescentes

Como guiar e acelerar o feixe de partículas

O LHC necessita criogenia e vácuo

Gamas de pressão :

diferentes tipos de sensores e tipos de bombas são utilizadas segundo os níveis de pressão

O sistema de vácuo está dividido em sectores (sectorizado)

A arquitectura do sistema de controlo do vácuo do CERN tem 3 camadas (campo , controlo , supervisão)

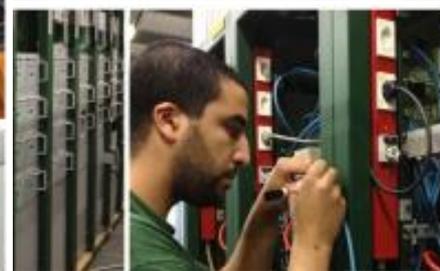
O SCADA é o software que permite aos operadores interagirem com o processo e analisar o passado

Nem todos os valores históricos são armazenados :

Valores analógicos: filtros permitem arquivar apenas o essencial

Todos os valores de estado são armazenados

# peçoal do vazio





# Conclusão

O LHC é precedido por uma cadeia de aceleradores de dimensões e energia crescentes

Como guiar e acelerar o feixe de partículas

O LHC necessita criogenia e vácuo

Gamas de pressão :

diferentes tipos de sensores e tipos de bombas são utilizadas segundo os níveis de pressão

O sistema de vácuo está dividido em sectores (sectorizado)

A arquitectura do sistema de controlo do vácuo do CERN tem 3 camadas (campo , controlo , supervisão)

O SCADA é o software que permite aos operadores interagirem com o processo e analisar o passado

Nem todos os valores históricos são armazenados :

Valores analógicos: filtros permitem arquivar apenas o essencial

Todos os valores de estado são armazenados