



Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado
Fisikako Gradua / Grado en Física

Cálculos de transmisión de haces de protones en el RFQ de 352 MHz de ESS-Bilbao

Egilea/Autor/a:
Jone Etxebarria Erdoiza

Zuzendaria/Director/a:
Iñaki Garay Elizondo

Ko-zuzendaria/Codirector:
Juan Luis Muñoz Villar

Índice general

1. Introducción	2
1.1. Breve historia del RFQ	2
1.2. Proyecto ESS-Bilbao	3
2. RFQ	7
2.1. Principios de funcionamiento de un RFQ	7
2.2. Geometría de los electrodos y componentes del campo eléctrico	9
2.3. Dinámica longitudinal	13
2.4. Bunching	15
2.5. Dinámica transversal	16
2.6. Emitancia	17
3. Simulación	19
3.1. GPT	19
3.2. Efecto Space Charge	20
3.3. Características principales del RFQ de ESS-Bilbao	21
4. Resultados	23
4.1. Modelo con geometría sin deformaciones, con condiciones de operación no ideales	24
4.2. Modelos con geometría deformada y condiciones de operación no ideales	26
4.2.1. 16 tuners uniformes	27
4.2.2. Deformaciones en los vanos	29
4.2.3. Unión entre segmentos	32
5. Conclusiones	34
Bibliografía	36

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo se estudia la dinámica de haces de protones en un acelerador de partículas RFQ (Radio Frequency Quadrupole). Esta memoria comienza con una descripción histórica de este tipo de aceleradores.

1.1. Breve historia del RFQ

La necesidad de disponer de un haz de mayor energía e intensidad ha provocado que los aceleradores de partículas hayan evolucionado mucho en el último siglo, ya sea para generar partículas más masivas, observar nuevos fenómenos o explorar la naturaleza en una escala más pequeña. Los aceleradores son muy útiles no solo en investigación, sino que se usan en muchos sectores, como la industria y la medicina. Por ejemplo en estudio de materiales, esterilización de equipamiento, radioterapia, etc.

Los aceleradores comenzaron siendo de tipo electrostático. Las partículas, iones o electrones, se colocaban en una diferencia de potencial y por ello, la aceleración estaba limitada por el voltaje máximo que se pudiera generar en el sistema. Obtener altas energías utilizando aceleradores electrostáticos es muy difícil y caro. Por este motivo se propuso el uso de campos que cambiaran con el tiempo, dando así paso a los aceleradores de radio frecuencia. [1]

Fue Gustav Ising, en 1924, quien propuso esto por primera vez. Su idea era aplicar el mismo voltaje periódicamente a las partículas usando campos alternos a lo largo de una serie de tubos de deriva o “drift tubes”. En los tubos de deriva se apantalla el campo eléctrico durante casi todo el ciclo de RF (Radio Frecuencia), de forma que cuando la partícula sale del tubo de deriva ve el pico de la onda de RF. Por este motivo, la longitud de los tubos va acompañada con la velocidad de la partícula y aumenta de longitud según esta va acelerando. En 1928, Rolf Wideröe demostró el principio de Ising creando el primer acelerador de tensión alterna. El problema era que al aumentar la velocidad de las partículas, la longitud de los tubos aumentaba demasiado. Esto se solucionó cerrando la estructura en una cavidad o series de cavidades resonantes. Hasta mediados del siglo XX se fue desarrollando esta idea, creando aceleradores cada vez más energéticos. El aumento de intensidad del haz acentúa los problemas de repulsión entre las partículas del haz, a más carga

espacial más fuerza de repulsión, por ello son también importantes los mecanismos focalizantes. [2]

La aceleración electrostática es eficiente hasta unos 100 kV aproximadamente (por tecnología) y la aceleración de RF comienza a ser eficiente a partir de unos 3 MeV (para protones, por la longitud tan pequeña que tendrían los tubos de deriva a energías más bajas). Entre la aceleración electrostática y la aceleración RF del resto de cavidades de RF, se necesita algún dispositivo especial.

Por este motivo en 1970, I. Kapchinski y V. Telyakov [3] propusieron el RFQ, combinando la idea de un cuadrupolo de radio frecuencia con un efecto acelerante obtenido debido a las modulaciones de los electrodos del cuadrupolo. El RFQ logra focalizar y acelerar el haz en una estructura muy compacta y es útil a bajas energías. En 1980, en los laboratorios LANL (Los Alamos National Laboratories) fue construido el POP (Proof Of Principle), el primer modelo de RFQ. [4]

Hoy en día hay cientos de RFQs operativos en el mundo.

1.2. Proyecto ESS-Bilbao

ESS-Bilbao es una de las instituciones designadas para contribuir a la Fuente Europea de Neutrones por Espalación (European Spallation Source, ESS), que se está construyendo en Lund, Suecia. Para producir neutrones es necesario acelerar protones hasta que adquieren una gran cantidad de energía para después hacerlos impactar sobre un blanco de tungsteno, dando lugar a la reacción nuclear que genera los neutrones. Será un centro ideal para el estudio y desarrollo de materiales, medio ambiente, ciencias de la vida, etc., ya que los neutrones permiten observar la estructura de la materia desde escala microscópica hasta escala atómica. [5]



Figura 1.1: Esquema de la Fuente Europea de Neutrones por Espalación (ESS) en Lund, Suecia. Figura extraída de [6].

Entre las contribuciones de ESS-Bilbao están: el MEBT (Medium Energy Beam

Transport) del acelerador, el blanco (Target) y parte de los instrumentos de neutrones.

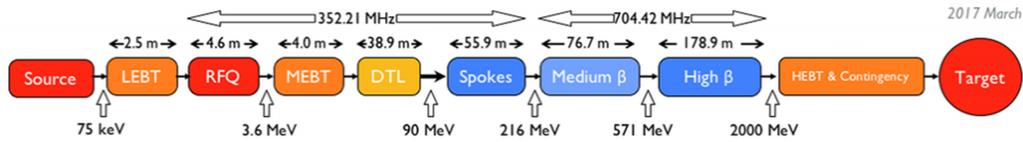


Figura 1.2: Esquema del acelerador de protones de ESS. Figura extraída de [5].

En el LINAC (Linear accelerator), el haz inicial de partículas se genera en la fuente de iones, para después ser transportado por el LEBT (Low Energy Beam Transport) hasta el RFQ, donde se acelera el haz hasta 3.6 MeV. En el MEBT (Medium Energy Beam Transport) se diagnostican las características longitudinales del haz y se optimizan para la siguiente sección, el DTL (Drift Tube Linac). Seguidamente, el haz es acelerado por tres secciones superconductoras y por último, es transportado al blanco mediante el “High Energy Beam Transport”. [5]

Además de las contribuciones en especie a ESS, en ESS-Bilbao también están desarrollando proyectos locales. Su objetivo es desarrollar un inyector de protones compuesto de (figura 1.3): una fuente de iones de tipo ECR (Electro Cyclotron Resonance), un LEBT (Low Energy Beam Transport) y un RFQ. [7]

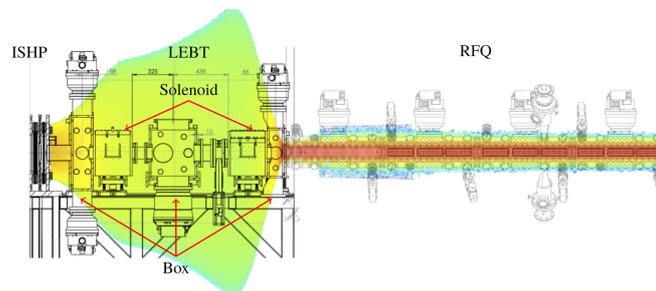


Figura 1.3: Esquema del inyector de protones de ESS-Bilbao. De izquierda a derecha: la fuente de iones, el LEBT y el RFQ. La sombra coloreada hace referencia a la densidad del haz a lo largo del inyector. Figura extraída de [8].

La fuente de iones está formada por una cámara de plasma en la que se introduce el gas H_2 . Dentro de la cámara los electrones ganan energía cinética mediante la resonancia electrón-ciclotrón (ECR). Un campo magnético estacionario hace que los electrones se muevan en trayectorias circulares o helicoidales con una frecuencia angular determinada por el valor de campo magnético. Esta frecuencia es de 2.7 GHz, que es la misma frecuencia de un campo eléctrico RF, de modo que los electrones ganan energía cinética con cada ciclo de RF. La frecuencia angular de la trayectoria se mantiene pero aumenta el radio y la energía cinética. Estos electrones que han ganado energía ionizan las moléculas de H_2 , creando un plasma. Los protones son entonces extraídos del plasma mediante un voltaje electrostático de 45 keV. [8]

El LEBT es una sección de transporte del haz a baja energía, que toma el haz extraído de la fuente de iones, lo enfoca y le da las características adecuadas para

la siguiente sección de aceleración. Este está compuesto por dos solenoides, en posición fija, que producen campos magnéticos sintonizables. Cada solenoide incluye un conjunto de dipolos cruzados para correcciones de dirección. Además, está equipado con tres vasijas diagnósticas de caracterización del haz.

Por último, el RFQ es un cuadrupolo de radiofrecuencia, que crea un campo eléctrico cuadrupolar y transforma el haz continuo en un haz “buncheado”, es decir, lo agrupa en paquetes. También lo enfoca y acelera.

El RFQ es una estructura de aceleración larga (el de ESS-Bilbao tiene 3.1 metros de longitud) y no es posible incorporar diagnósticos de caracterización del haz en su interior. Tampoco es posible actuar sobre el mismo para efectuar posibles correcciones de trayectoria, de sección transversal o de otros parámetros del haz [7]. Además, el haz viaja a través de una región muy estrecha de unos 3-4 mm de radio (confinado por intensos campos eléctricos) y cualquier desviación termina con el haz chocando contra el cobre de la estructura, perdiéndose por tanto protones y disminuyendo la transmisión.

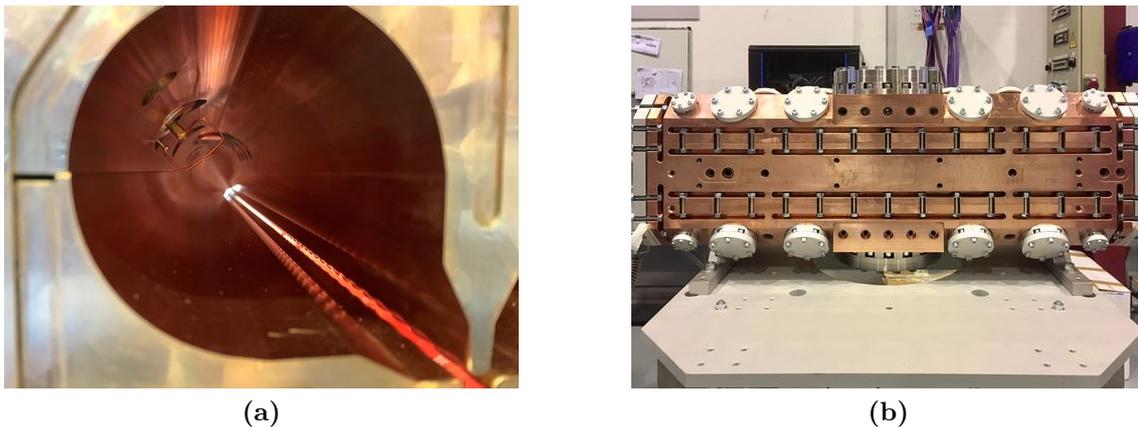


Figura 1.4: (a) Sección transversal y (b) sección longitudinal del primer segmento del RFQ de ESS-Bilbao. J. L. Muñoz

Por tanto, el parámetro fundamental para evaluar el rendimiento de un RFQ es la transmisión, que es la diferencia (en tanto por ciento) de la intensidad del haz a la salida respecto a la de la entrada del RFQ. Cualquier desviación de las condiciones de diseño, tanto en lo que se refiere a las características del haz de entrada o de la fabricación o sintonizado del mismo RFQ, hará que la transmisión disminuya.

Además, cada uno de los RFQs fabricados en el mundo es un prototipo diferente. Cada dispositivo se diseña y fabrica para cumplir con las especificaciones de cada instalación y es raro que haya dos diseños de RFQs idénticos. Por tanto, el diseño acarrea muchos cálculos y estudios computacionales previos a la fabricación y prueba de los equipos finales [7]. Estos estudios incluyen no solo cálculos de elementos finitos (electromagnéticos, principalmente) para diseñar y comprender la distribución de los campos de RF dentro de la propia estructura de aceleración, sino que también se realizan cálculos de dinámica de haz para estudiar cómo los cam-

pos electromagnéticos en el interior de la cavidad afectan a la transmisión del mismo.

Dispositivos parecidos a este se han fabricado recientemente para los proyectos FETS-ISIS de RAL [9], ESS (Lund) [10] o LINAC 4 [11] (el nuevo inyector del LHC (Large Hadron Collider) del CERN).

El RFQ de ESS-Bilbao se encuentra actualmente en fabricación, por lo que su diseño está ya cerrado. A principios de 2020, recibieron el primer segmento del RFQ (está formado por cuatro segmentos) y está previsto que entre en operación durante 2021. Será el primer acelerador de protones de estas características diseñado, fabricado y operado en el estado español. No obstante, todavía es necesario realizar estudios de dinámica de haz con varios objetivos principales (que han sido los objetivos estudiados en este trabajo).

En primer lugar, el rendimiento del acelerador dependerá de las condiciones del haz de entrada. El haz que llega al RFQ se produce en la fuente de iones y atraviesa después una línea de transmisión que incluye imanes y diagnósticos de haz antes de llegar al RFQ. El haz tendrá unas determinadas características que se podrán controlar actuando sobre los imanes o la fuente de iones y la transmisión del RFQ dependerá de estas condiciones del haz (energía, intensidad, emitancia, etc.) [8]. El estudiar, mediante simulaciones de dinámica de haz, cómo estas condiciones de entrada alteran la transmisión es muy útil para entender el funcionamiento del dispositivo y realizar el control de la operación del acelerador.

Por otro lado, está el “sintonizado” del RFQ, que es una cavidad resonante que tiene que operar a una determinada frecuencia, pero en el que además la distribución de los campos aceleradores (lo que se conoce como el “voltaje entre vanos”) debe mantenerse uniforme a lo largo de toda la estructura [7]. Para ello se utilizan unos elementos sintonizadores (“tuners”) que permiten ajustar este perfil de campo. El definir cuándo el campo está correctamente sintonizado solo puede determinarse haciendo pasar el haz por la estructura y midiendo experimentalmente la transmisión. Pero los cálculos combinados de elementos finitos (para calcular los campos) y dinámica de haz permiten conocer previamente cuáles son los objetivos que deberán cumplirse con el sintonizado.

Por último, la fabricación de un RFQ involucra mecanizados en cobre con tolerancias muy exigentes (por debajo de 10-20 micras). Cualquier desviación mecánica de la estructura ideal empeorará el funcionamiento del acelerador y por lo tanto, la transmisión. Para determinar el efecto de diferentes tipos de deformaciones y anticipar los mecanismos para corregirlas, se realizan también cálculos combinados de elementos finitos con dinámica de haz.

En este trabajo se realizan cálculos de dinámica de haz, con campos electromagnéticos generados previamente mediante cálculos de elementos finitos, para estudiar estos aspectos del RFQ de ESS-Bilbao.

Capítulo 2

RFQ

2.1. Principios de funcionamiento de un RFQ

El RFQ o cuadrupolo de radio frecuencia es un acelerador lineal, ideal para acelerar haces de baja velocidad. Es un importante acelerador para protones y otros iones y los acelera desde decenas de keV hasta varios MeV. Suele usarse como primera sección de aceleración en aceleradores lineales (LINAC). Este realiza tres funciones al mismo tiempo: acelera el haz, lo enfoca transversalmente y agrupa las partículas en “bunches” o paquetes, optimizando así la aceleración en las siguientes secciones del acelerador.

En el RFQ, el haz es acelerado por campos eléctricos longitudinales y focalizado transversalmente por campos eléctricos de cuadrupolo, ambos de radio frecuencia. Una ventaja del enfoque de RF es que la fuerza eléctrica es más fuerte que la fuerza magnética para partículas a baja energía. Estos campos están determinados por la geometría de los electrodos del RFQ. Los electrodos son en este caso cuatro vanos (figura 2.1). [3]

El efecto focalizante se obtiene al aplicar un voltaje $\pm V_0 \cos(\omega t)/2$ en los cuatro electrodos. Este efecto es necesario a la hora de transportar un haz, ya que, en este caso los protones se repelen y el haz diverge.

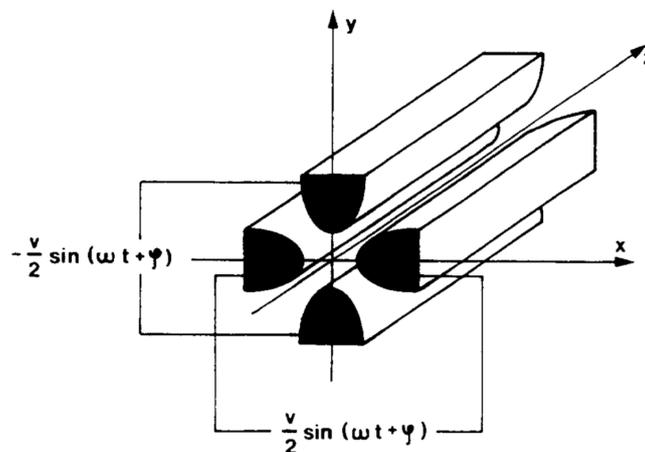


Figura 2.1: Cuadrupolo eléctrico, con un voltaje alterno. Figura extraída de [12].

Es decir, las partículas experimentan un campo eléctrico cuadrupolar que cambia de polaridad con el tiempo, que enfoca el haz en una dirección y lo desenfoca en la contraria, según el haz avanza por el eje z . El efecto puede observarse en la siguiente imagen:

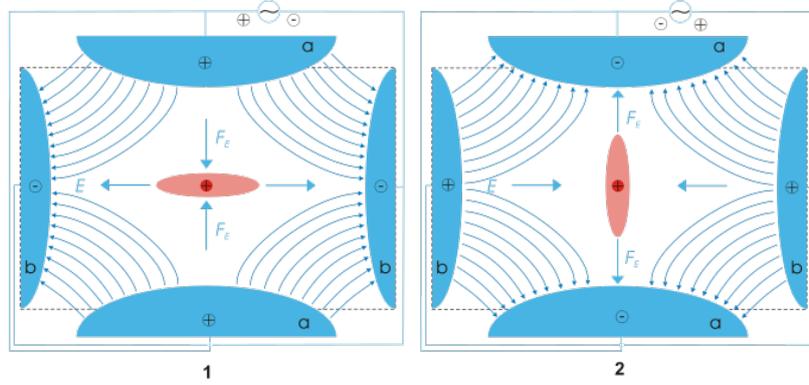


Figura 2.2: Cuadrupolo eléctrico y sus fuerzas. Figura extraída de [13].

Si la geometría de los vanos fuera uniforme a lo largo del eje, las partículas no experimentarían la componente longitudinal del campo eléctrico. Por ello, los vanos verticales se desplazan respecto a los horizontales (figura 2.5) y se introduce una modulación de la geometría de la punta de los electrodos (figura 2.3a). Como se puede ver en la siguiente imagen esta modulación produce el campo eléctrico longitudinal:

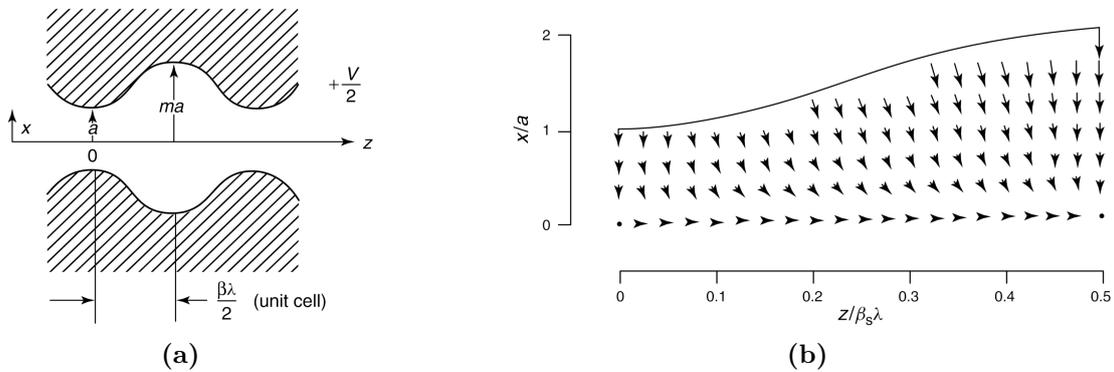


Figura 2.3: (a) Modulación de la punta del electrodo del RFQ. (b) Vectores del campo eléctrico longitudinal respecto a la modulación del electrodo. Figuras extraídas de [3].

Si el potencial de los electrodos no dependiera del tiempo, las partículas se acelerarían y desacelerarían a partes iguales. Para tener un efecto acelerante a lo largo de toda la estructura, el desplazamiento de las partículas debe estar en sincronía con la componente longitudinal del campo, que varía con el tiempo. Es decir, si el campo varía con una frecuencia ν las partículas deberán recorrer una distancia $\beta\lambda$ (siendo λ la longitud de onda asociada con la frecuencia ν) para experimentar en todo momento la componente acelerante. Es también por esto que las partículas tienden a agruparse donde las fuerzas son acelerantes. Aún así, hay partículas que

no se agrupan y no ganan la suficiente energía para ser capturadas por las siguientes secciones del acelerador.

Los electrodos del RFQ deben cargarse periódicamente en la frecuencia de RF (352 MHz), ya que aplicar el voltaje (85 kV) de RF directamente a los electrodos no es posible tecnológicamente. Esto se consigue colocando los electrodos en una cavidad de RF, que resuena a la frecuencia de trabajo. El modo resonante es un campo eléctrico cuadrupolar en el plano transversal. El campo eléctrico transversal está localizado cerca de la punta de los vanos y el campo magnético longitudinal, está localizado en los cuadrantes exteriores.

2.2. Geometría de los electrodos y componentes del campo eléctrico

En esta sección se analiza la estructura de cuadrupolo del RFQ y las componentes del campo eléctrico. De la descripción de la función de potencial se obtiene la forma de los electrodos para producir los campos adecuados para el haz. Se considera que la contribución al campo eléctrico de la carga eléctrica de los electrodos es mucho mayor a la del campo magnético, ya que en el modo resonante a la frecuencia de trabajo, el campo eléctrico queda separado en el espacio del campo magnético, de manera que aproximar la onda con un voltaje puramente eléctrico es adecuado. También se considera que la estructura es periódica, aunque la geometría de los vanos cambie debido al incremento de la velocidad de las partículas. [3]

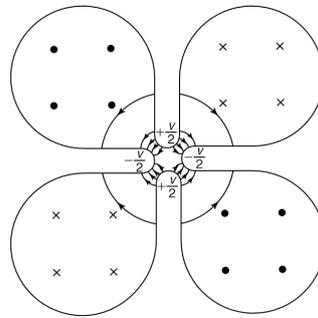


Figura 2.4: Sección transversal del cuadrupolo eléctrico, con líneas del campo eléctrico en el plano transversal y líneas del campo magnético en el plano longitudinal, perpendicular a la página. Figura extraída de [3].

Por lo tanto, el problema se reduce a la solución de la ecuación de Laplace para un potencial electrostático [12]. La ecuación de Laplace en coordenadas cilíndricas es la siguiente:

$$\nabla^2 U(r, \theta, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (2.1)$$

$U(r, \theta, z)$ es la solución del potencial del campo eléctrico para un instante del tiempo. El potencial real tiene una dependencia sinusoidal del tiempo, tal que así:

$$U(r, \theta, z, t) = U(r, \theta, z) \sin(\omega t + \phi), \quad (2.2)$$

donde $\omega/2\pi$ es la frecuencia de RF y ϕ la fase inicial del potencial. Utilizando el método de separación de variables,

$$U(r, \theta, z) = R(r)\Theta(\theta)Z(z), \quad (2.3)$$

y aplicando las siguientes condiciones de contorno:

- $U(r, \theta, -z) = U(r, \theta, z)$
- $U(r, \theta, z + \beta\lambda) = U(r, \theta, z)$
- $U(r, -\theta, z) = U(r, \theta, z)$
- $U(r, \pi \pm \theta, z) = U(r, \theta, z)$
- $-U(r, \theta \pm \frac{\pi}{2}, \frac{\beta\lambda}{2} - z) = U(r, \theta, z)$

donde $\beta\lambda/2$ es la longitud de celda. Desarrollando,

$$\frac{1}{r^2} \left\{ \left[\frac{r^2}{R(r)} \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{r}{R(r)} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{\partial^2 \Theta(\theta)}{\partial \theta^2} \right\} + \frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = 0, \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = -k_z^2 \quad (2.5)$$

y

$$\frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{\partial^2 \Theta(\theta)}{\partial \theta^2} = -k_\theta^2. \quad (2.6)$$

Se obtiene,

$$k_z \beta \lambda = 2m\pi \quad (2.7)$$

y

$$k_\theta = 2n, \quad (2.8)$$

donde n y m cumplen la relación $n + m = 2p + 1$. Por lo que se consigue:

$$\frac{r^2}{R(r)} \left[\frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] - \left[m^2 k^2 r^2 + 4n^2 \right] = 0, \quad (2.9)$$

donde $k = 2\pi\beta\lambda$. Para el caso $m = 0$,

$$r^2 \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + r \frac{\partial R(r)}{\partial r} - 4n^2 R(r) = 0, \quad (2.10)$$

se obtiene una solución del tipo:

$$R(r) = C_n r^{2n}. \quad (2.11)$$

Para el caso $m \neq 0$ se obtiene la siguiente solución, Bessel modificada [14]:

$$R(r) = I_{2n}(mkr). \quad (2.12)$$

Por tanto, la solución general es la siguiente:

$$U(r, \theta, z) = \sum_n A_n r^{2n} \cos(2n\theta) + \sum_n \sum_m A_{mn} I_{2n}(mkr) \cos(2n\theta) \cos(mkz). \quad (2.13)$$

Construir una geometría arbitraria de los electrodos requeriría muchos términos de la solución general del potencial. Por ello, I. Kapchinski y V. Telyakov propusieron seleccionar solamente los primeros términos de las series, para después construir la geometría que se ajuste a las superficies equipotenciales resultantes [3]. El potencial de dos términos sería el siguiente:

$$U(r, \theta, z) = A_1 r^2 \cos(2\theta) + A_{10} I_0(kr) \cos(kz), \quad (2.14)$$

donde el primer término representa un cuadrupolo eléctrico y el segundo el campo acelerador. Las constantes A_1 y A_{10} dependen de la geometría de los electrodos. El potencial debe cumplir las siguientes condiciones (figura 2.5):

$$U(a, 0, 0) = \frac{V_0}{2}, \quad (2.15)$$

y

$$U(ma, \frac{\pi}{2}, 0) = -\frac{V_0}{2}. \quad (2.16)$$

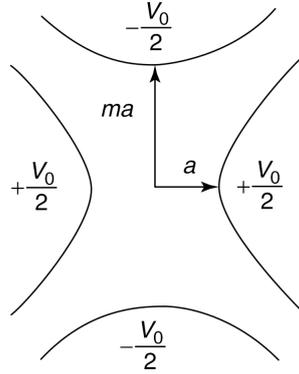


Figura 2.5: Geometría del cuadrupolo eléctrico. Figura extraída de [3].

Evaluando el potencial en las condiciones anteriores,

$$\frac{V_0}{2} = A_1 a^2 + A_{10} I_0(ka) \quad (2.17)$$

y

$$\frac{-V_0}{2} = A_1 (ma)^2 + A_{10} I_0(kma), \quad (2.18)$$

se obtiene el valor de las constantes:

$$A_1 = \frac{V_0}{2a^2} \frac{I_0(ka) + I_0(kma)}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)} \quad (2.19)$$

y

$$A_{10} = \frac{V_0}{2} \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)}. \quad (2.20)$$

Es útil definir las siguientes constantes adimensionales:

$$X = \frac{I_0(ka) + I_0(kma)}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)} \quad (2.21)$$

y

$$A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)}. \quad (2.22)$$

Por lo tanto, $A_1 = xV_0/2a^2$ y $A_{10} = AV_0/2$.

Así, el potencial completo es el siguiente:

$$U(r, \theta, z, t) = \frac{V_0}{2} \left[X \left(\frac{r}{a} \right)^2 \cos(r\theta) + AI_0(kr) \cos(kz) \right] \sin(\omega t + \phi) \quad (2.23)$$

y expresandolo en coordenadas cartesianas:

$$U(x, y, z, t) = \frac{V_0}{2} [X(x^2 - y^2) \cos(r\theta) + AI_0(kr) \cos(kz)] \sin(\omega t + \phi). \quad (2.24)$$

Entonces, queda definida la geometría de los electrodos, partiendo de las superficies equipotenciales. De 2.24, la punta x en $y = 0$:

$$1 = \frac{X}{a^2} x^2 + AI_0(kx) \cos(kz) \quad (2.25)$$

y la punta y en $x = 0$:

$$-1 = -\frac{X}{a^2} y^2 + AI_0(ky) \cos(kz). \quad (2.26)$$

Resolviendo las ecuaciones previas se obtiene la geometría de los electrodos.

$$x = \pm \sqrt{\frac{1 - A \cos(kz)}{\frac{X}{a^2} + \frac{Ak^2}{4} \cos(kz)}} \quad (2.27)$$

y

$$y = \pm \sqrt{\frac{1 + A \cos(kz)}{\frac{X}{a^2} + \frac{Ak^2}{4} \cos(kz)}}. \quad (2.28)$$

Las secciones transversales son aproximadamente hipérbolas. En la figura 2.6 puede verse la modulación de los vanos a lo largo del eje z y el perfil transversal de estos.

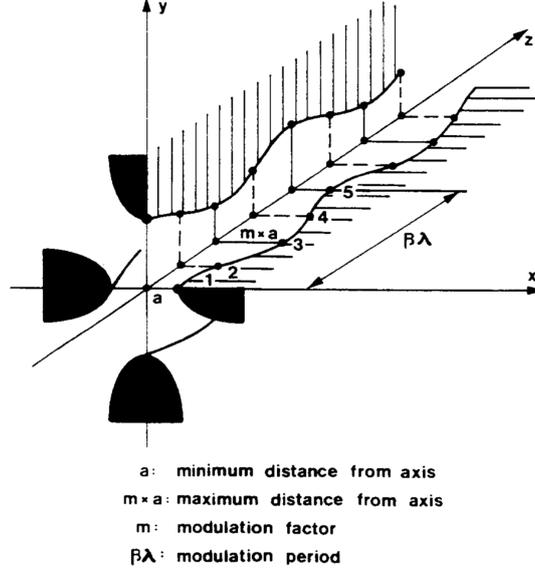


Figura 2.6: Forma y modulación de los electrodos del RFQ. Figura extraída de [12].

Para terminar, el campo eléctrico puede obtenerse directamente del gradiente de la función de potencial, $\mathbf{E} = -\nabla U$. Se obtienen las componentes cartesianas del campo eléctrico [3]:

$$E_x = -\frac{XV_0}{a^2}x - \frac{kAV_0}{2}I_1(kr)\frac{x}{r}\cos(kz)\sin(\omega t + \phi), \quad (2.29)$$

$$E_y = \frac{XV_0}{a^2}y - \frac{kAV_0}{2}I_1(kr)\frac{y}{r}\cos(kz)\sin(\omega t + \phi) \quad (2.30)$$

y

$$E_z = \frac{kV_0A}{2}I_0(kr)\sin(kz)\sin(\omega t + \phi). \quad (2.31)$$

Las funciones modificadas de Bessel pueden aproximarse de la siguiente manera [14]: $I_0(\nu) \cong 1 + \nu^2/4$ y $I_1(\nu) \cong \nu/2$.

2.3. Dinámica longitudinal

En esta sección se estudia la dinámica longitudinal y para ello, se utiliza la solución obtenida del campo eléctrico en el eje z con dependencia del tiempo:

$$E_z = \frac{kV_0A}{2}I_0(kr)\sin(kz)\sin(\omega t + \phi). \quad (2.32)$$

La ganancia de energía de una partícula en una celda es la siguiente:

$$\Delta W = \frac{qkAV_0I_0(kr)}{2} \int_0^l \sin(kz)\sin(k'z + \phi)dz, \quad (2.33)$$

donde $\omega t = 2\pi z/\beta'\lambda$, $k' = 2\pi/\beta'\lambda$, $k = 2\pi\beta_s\lambda$ y $l = \beta_s\lambda/2$ es la longitud de una celda.

En el caso de una partícula síncrona, es decir, cuando una partícula viaja del centro de una celda a la siguiente en el mismo tiempo que el campo cambia su polaridad, la partícula obtendrá una aceleración máxima [3]. En este caso, se cumple $\beta' = \beta_s$ y la ganancia de energía es la siguiente:

$$\Delta W = \frac{q\pi AV_0 I_0(kr) \cos(\phi)}{4}. \quad (2.34)$$

El estudio de la dinámica longitudinal se hace en relación a la ganancia de energía de la partícula síncrona. Para tener un movimiento estable, las partículas deben oscilar en fase y energía alrededor de la partícula síncrona. Las partículas que llegan antes que la partícula síncrona, experimentan un campo más pequeño, en cambio las partículas que llegan después experimentan un campo más grande. Debido a esto, se produce una fuerza longitudinal que provee una aceleración estable en fase.

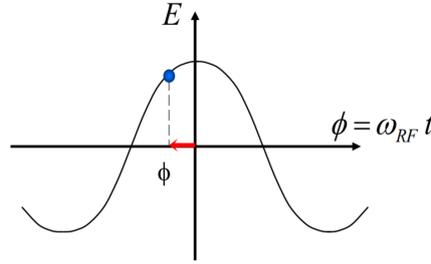


Figura 2.7: Convención en los aceleradores lineales, en $t=0$ el voltaje está en la cresta positiva. Figura extraída de [15].

Para obtener las ecuaciones que describen el enfoque longitudinal se calcula por un lado, la ganancia de energía de una partícula con fase ϕ y a esta se le resta la ganancia de energía de una partícula síncrona de fase ϕ_s :

$$\frac{d(W - W_s)}{dz} = qE_0 T(I_0(kr) \cos \phi - \cos \phi_s). \quad (2.35)$$

Por otro lado, se calcula la diferencia de fase entre una partícula arbitraria y una síncrona:

$$\frac{d(\phi - \phi_s)}{dz} = -\frac{2\pi(W - W_s)}{mc^2 \beta_s^3 \lambda}. \quad (2.36)$$

Combinando las dos ecuaciones en una ecuación de segundo orden se obtiene la ecuación de un oscilador armónico ($-\pi < \phi_s < 0$),

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} + k_l^2 \phi = 0, \quad (2.37)$$

donde el número de onda es

$$k_l^2 = \frac{\pi^2 q AV_0 I_0(kr) \sin(-\phi_s)}{mc^2 \beta_s^4 \lambda^2}. \quad (2.38)$$

2.4. Bunching

En aceleradores de tipo RF es imprescindible “bunchear” o separar el haz en paquetes para que todas las partículas se aceleren. Un haz “buncheado” o empaquetado, tiene las partículas agrupadas alrededor de una fase, la fase de partícula síncrona. De este modo el grupo de partículas se comporta idealmente como una única macropartícula síncrona y la aceleración es uniforme sobre todas las partículas. Todas las partículas aprovechan así de forma eficiente la energía de la onda de RF.

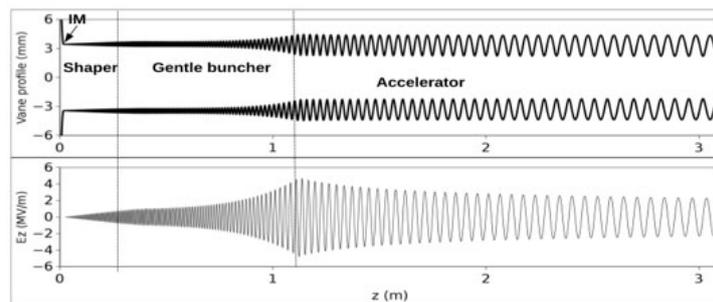


Figura 2.8: Amplitud de la modulación y campo eléctrico longitudinal del RFQ de ESS-Bilbao. Figura extraída de [7].

Se “bunchea” el haz a lo largo de varias celdas para maximizar la captura de partículas y minimizar la emitancia. En el RFQ este fenómeno se debe al campo longitudinal en el eje z . Se aplica el campo de radio frecuencia al haz no “buncheado” para producir una modulación de la velocidad. Las partículas que llegan antes del cambio de polaridad del campo se desaceleran y las partículas que llegan después son aceleradas. Así, después de varias celdas, el haz se separa en paquetes y está listo para ser acelerado a mayor energía en las siguientes secciones del acelerador. [3]

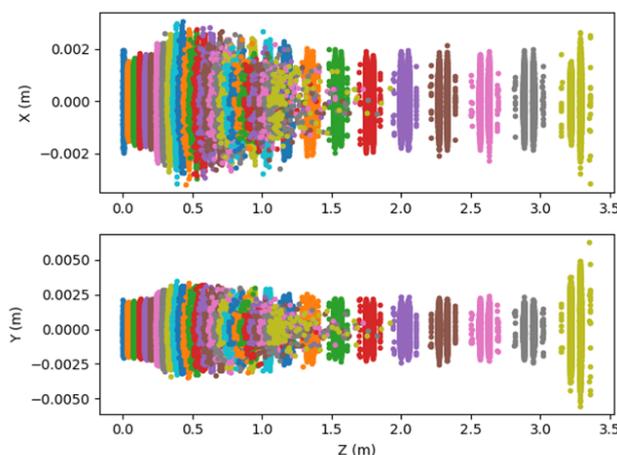


Figura 2.9: Desarrollo del haz a lo largo del RFQ de ESS-Bilbao, cada color indica un instante del tiempo.

Al inicio del RFQ, la modulación de los electrodos y el campo acelerador son pequeños, pero una vez el haz empieza a separarse más, la amplitud de la modulación se hace más grande y así comienza a acelerarse. En la figura 2.9 (cada color indica un instante de tiempo) se puede ver como un haz compacto, se divide en varios paquetes tras la sección “Gentle buncher” (figura 2.8) y después las partículas se aceleran conjuntamente.

2.5. Dinámica transversal

En esta sección se estudia la dinámica trasversal de haz, es decir, las propiedades focalizantes del RFQ. Para ello se utilizan las componentes del campo eléctrico, E_x y E_y , obtenidas previamente.

La ecuación de movimiento en cualquiera de los planos transversales (x, y) es la siguiente, escogiendo x :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m}E_x, \quad (2.39)$$

donde el campo eléctrico en el eje x es

$$E_x = -\frac{XV_0}{a^2}x - \frac{kAV_0}{2}I_1(kr)\frac{x}{r}\cos(kz)\sin(\omega t + \phi), \quad (2.40)$$

donde para pequeñas variaciones de r se aproxima la función de Bessel modificada $I_1 \sim kr/2$ [14].

Por lo tanto, la ecuación de movimiento es la siguiente:

$$\ddot{x} + \left[\frac{qXV_0}{ma^2} + \frac{qk^2AV_0}{4m}\cos(kz) \right] x \sin(\omega t + \phi) = 0. \quad (2.41)$$

El primer término entre paréntesis, es el término de cuadrupolo y el segundo está relacionado con la modulación de los electrodos, que produce los campos longitudinales [3]. Ya que, $kz = \omega t$, el segundo término es proporcional a

$$\cos(\omega t)\sin(\omega t + \phi) = [\sin\phi + \sin(2\omega t + \phi)]/2. \quad (2.42)$$

En una primera aproximación se ignora la contribución de este término y se escribe la ecuación

$$\ddot{x} + \left[\frac{qXV_0}{ma^2}\sin(\omega t + \phi) + \frac{qk^2AV_0}{8m}\sin\phi \right] x = 0. \quad (2.43)$$

Esta ecuación es una ecuación de Mathieu [14], con solución del tipo:

$$x = [C_1 \sin \Omega t + C_2 \cos \Omega t][1 + \epsilon \sin(\omega t + \phi)], \quad (2.44)$$

donde Ω es la frecuencia de oscilación, conocida como frecuencia de “betatron”. El término del segundo paréntesis es una función periódica, que varía con la frecuencia

de RF y se llama factor “flutter” y ϵ es la amplitud “flutter”. Considerando la solución $C_1 = 1$ y $C_2 = 0$ por simplicidad, se obtiene

$$\ddot{x} \cong -\epsilon\omega^2 \sin(\Omega t) \sin(\omega t + \phi). \quad (2.45)$$

Una solución aproximada de 2.43 se obtiene al elegir la amplitud:

$$\epsilon \cong \frac{qXV_0}{m\omega^2 a^2} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{qXV_0\lambda^2}{mc^2 a^2}. \quad (2.46)$$

Después, substituyendo la ecuación 2.44 en la ecuación 2.43 y haciendo la media a lo largo de un periodo de RF:

$$\bar{\ddot{x}} \cong -\Omega^2 \sin(\Omega t). \quad (2.47)$$

Por lo tanto, la aproximación muestra que el desplazamiento medio satisface la ecuación del oscilador armónico simple $\bar{\ddot{x}} + \Omega^2 \bar{x}$, donde

$$\Omega^2 \cong \frac{1}{2} \left[\frac{qXV_0}{m\omega a^2} \right]^2 + \frac{qk^2 V_0 A \sin \phi}{8m}. \quad (2.48)$$

Siendo Ω^2 una medida de la fuerza efectiva de enfoque. El primer término es la contribución del cuadrupolo focalizante y el segundo término representa el desfocalizamiento de RF.

2.6. Emitancia

La emitancia es un parámetro muy útil a la hora de describir un haz y la dinámica transversal. Un haz de partículas en el espacio de fases puede definirse como una nube de puntos dentro de una elipse (figura 2.10). La superficie de esta elipse es proporcional a la emitancia y se mide en $\pi \text{ mm mrad}$ [16]. La ecuación de la elipse es la siguiente:

$$\epsilon = \gamma(s)x^2 + 2\alpha(s)xx' + \beta(s)x'^2, \quad (2.49)$$

donde ϵ , β , α y γ se definen como los parámetros de Courant-Snyder o parámetros Twiss y la variable s equivale a la variable z . Los parámetros de Courant-Snyder se relacionan de la siguiente manera:

$$\alpha(s) = -\frac{1}{2} \frac{d\beta(s)}{ds} \quad (2.50)$$

y

$$\gamma(s) = \frac{1 + \alpha(s)^2}{\beta(s)}. \quad (2.51)$$

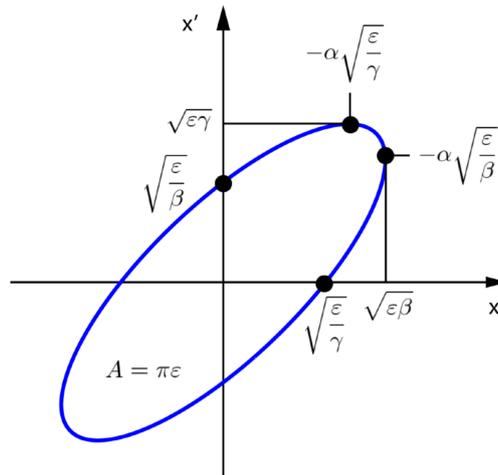


Figura 2.10: Parámetros de la elipse en el espacio de fases con emitancia ϵ . Figura extraída de [17].

Medir la emitancia y los parámetros Courant-Snyder da información sobre el tamaño del haz, limitaciones de apertura, divergencia y convergencia del haz, etc. Estos parámetros también permiten definir el haz de entrada. En la siguiente imagen se ve la evolución de un haz y la información que da la elipse en el espacio de fases del comportamiento del haz.

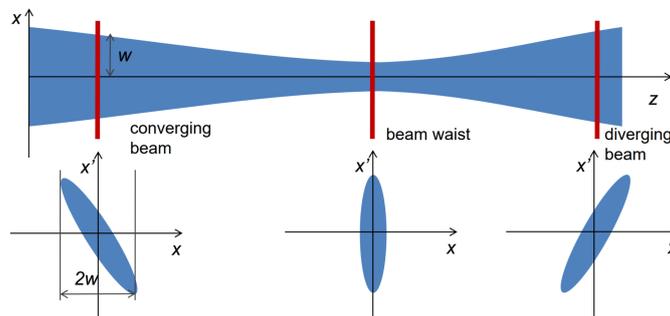


Figura 2.11: Desarrollo de un haz, arriba en el corte transversal xz y abajo en el espacio de fases. De izquierda a derecha, el haz converge y después diverge. Figura extraída de [18].

Capítulo 3

Simulación

En esta sección se describen las herramientas y características para llevar a cabo las simulaciones de dinámica del haz. Para simular el funcionamiento del RFQ son necesarias dos herramientas. Por un lado, un simulador que estime el campo eléctrico en cualquier punto de la cavidad y por otro lado, un código que simule el movimiento de las partículas en el campo eléctrico mencionado antes [19]. Para ello se ha utilizado una combinación de COMSOL y GPT. COMSOL es un software de análisis y resolución por elementos finitos, con el que se han generado los campos del RFQ ¹. Después utilizando GPT o General Particle Tracer, se ha simulado la dinámica de un haz de protones en un RFQ. De los resultados generados por GPT se han obtenido los valores de transmisión del haz, es decir, qué porcentaje de las partículas que ha entrado en el RFQ ha salido. Utilizar esta combinación de herramientas es muy efectivo y optimiza el tiempo de ejecución.

3.1. GPT

GPT o General Particle Tracer, es un software desarrollado para estudiar la dinámica de partículas cargadas 3D en campos electromagnéticos. Este utiliza el método de Runge-Kutta de paso adaptativo de quinto orden para resolver las ecuaciones. [20]

El número de partículas en los sistemas a estudiar suele ser muy alto, por ello, para hacer las simulaciones más eficaces, también utiliza el método PIC o Particle in Cell. Este método representa el haz como un grupo de macropartículas, con carga $q = nq_p$ y masa $m = nm_p$ donde n , el número de partículas por macropartícula, es del orden de 10^{10} o superior.

En este caso el número de macropartículas establecido ha sido 10000, ya que con este valor se obtiene un buen equilibrio entre precisión y tiempo de computación. En las siguientes imágenes, se puede ver a la izquierda cómo el valor de la transmisión (porcentaje de partículas que salen del acelerador a la energía adecuada con respecto a las que entran) respecto al número de macropartículas llega a un valor estable con 10000 macropartículas. A la derecha se puede ver cómo el tiempo de computación va subiendo con el aumento del valor de macropartículas. Por lo tanto, utilizar más

¹Campos generados por J.L. Muñoz .

de 10000 requeriría demasiado tiempo y no mejoraría el valor de los resultados.

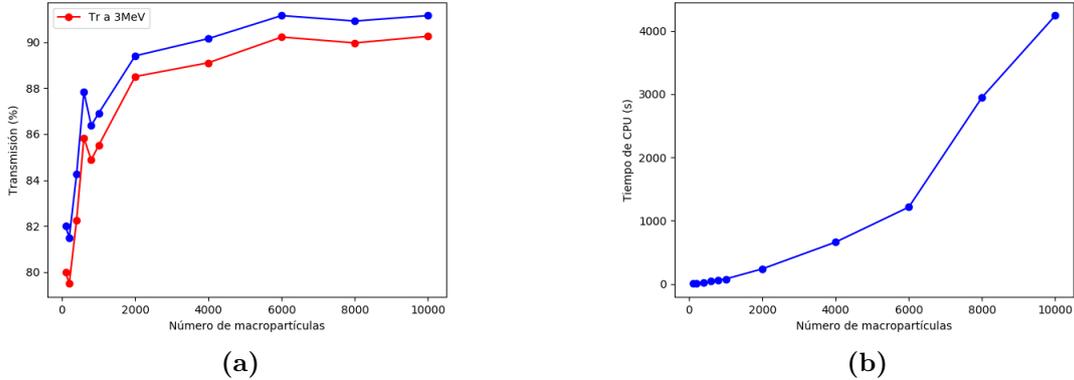


Figura 3.1: (a) Transmisión del haz respecto al número de macropartículas y (b) tiempo de computación respecto al número de macropartículas .

3.2. Efecto Space Charge

El “Space charge” o carga espacial es uno de los efectos más fundamentales a tener en cuenta. Las fuerzas de Coulomb entre las partículas cargadas en el acelerador crean un campo que actúa sobre el haz, desenfoándolo en ambos planos transversales.

En el caso de dos protones con carga $+e$ en reposo, estas sufren una fuerza de repulsión debido a la fuerza de Coulomb. Cuando están en movimiento con una velocidad v , representan dos corrientes paralelas que se atraen debido al campo magnético. El efecto total es repulsivo, pero decrece con el aumento de la velocidad. La fuerza total es proporcional a $(1 - v^2/c^2)F_e$ y se anula cuando la partícula alcanza la velocidad de la luz. [21]

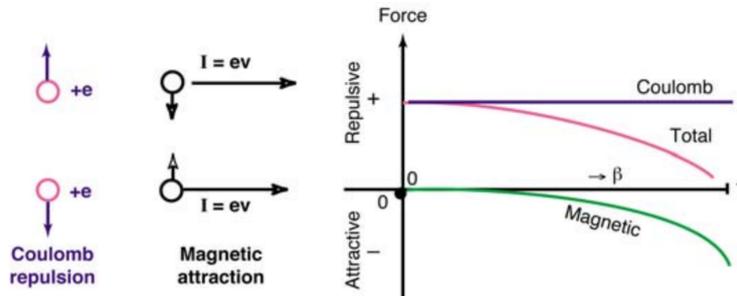


Figura 3.2: Repulsión de Coulomb y atracción magnética entre dos protones, en reposo y con velocidad v . Figura extraída de [21].

GPT ofrece varios modelos de “Space Charge”. Se han comparado varios modelos para optimizar el tiempo de computación, como se ve en las siguientes imágenes. A la izquierda se ha utilizado el modelo SC3D y a la derecha el modelo SCTree. Fijando (figura 3.3) el número de macropartículas en 10000, el modelo SC3D necesita 5

veces más tiempo de computación que el modelo SCTree. Por ello, se ha utilizado este último.

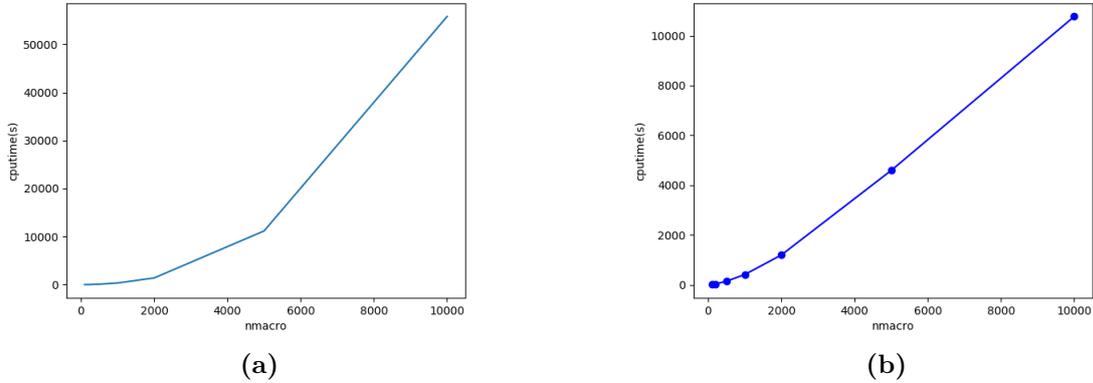


Figura 3.3: Tiempo de computación respecto al número de macropartículas con (a) el modelo SC3D y (b) el modelo SCTree.

El modelo SCTree utiliza el algoritmo de tipo árbol Barnes-Hut para simular n-cuerpos. Este modelo utiliza una estructura jerárquica de tipo árbol que divide el espacio en celdas cúbicas y cada una de estas se divide a la vez en 8 celdas cuando es ocupada por más de una macropartícula. Se construye un árbol por cada momento del tiempo. [22]

3.3. Características principales del RFQ de ESS-Bilbao

Las características principales del haz de entrada del RFQ de ESS-Bilbao y las características propias del RFQ, necesarias para la simulación, se han resumido en las siguientes tablas.

Tabla 3.1: Características del haz de entrada del RFQ de ESS-Bilbao. [23]

Parámetro	Valor
Partícula	Protón
Energía	45 keV
Corriente de entrada:	60 mA
Parámetros C-S de entrada:	
α_x	1.139
α_y	1.202
β_x	0.0303 m/rad
β_y	0.0302 m/rad
Emitancia transversal de entrada	0.25 π mmrad

El haz de protones es definido por su energía, 45 kV, su intensidad, 60 mA, y las constantes Courant-Snyder, que describen su forma. También se ha distribuido el

haz en un pequeño intervalo del tiempo y uniformemente en el espacio. Por último, se ha aplicado el efecto “space charge”.

Tabla 3.2: Características principales del RFQ de ESS-Bilbao. [23]

Parámetro	Valor
Tipo	4 vanos
Frecuencia RFQ	352.2 MHz
Voltaje entre vanos	85 kV
Longitud	3.132 m
Número de segmentos	4
R_0	3.44 mm
Número de celdas	273

El RFQ tiene una longitud de 3.132 m (formado por 273 celdas en cuatro segmentos) y el haz viaja por una región de 3.44 mm de radio, estas siendo las condiciones de contorno aplicadas al haz. El RFQ se define utilizando un mapa de campos y un mapa de geometría.

Capítulo 4

Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones para diferentes condiciones del RFQ. Estos modelos se acercan más a la realidad, pudiendo así anticipar cómo se comportará el RFQ. Todas las simulaciones de esta sección, se han ejecutado utilizando los parámetros descritos en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Partícula	Protón
Número de macropartículas	10000
Energía de entrada	45 keV
Corriente de entrada:	60 mA
Voltaje entre vanos	85 kV
Parámetros C-S de entrada:	
α_x	1.139
α_y	1.202
β_x	0.030 3m/rad
β_y	0.0302 m/rad
Emitancia transversal de entrada	0.25 π mmrad

Es importante destacar que se ha calculado un modelo de elementos finitos diferente para cada caso estudiado, por ello siempre se compararán los resultados por separado.

Se han obtenido los valores de transmisión total y los valores de transmisión a 3 MeV, es decir, qué porcentaje de las partículas que han entrado han salido con energía en torno a 3 MeV (%5 de margen).

Aun habiendo optimizado el valor de macropartículas y el modelo de “Space Charge”, cada uno de los modelos estudiados ha llevado alrededor de una semana de tiempo de computación, ya que cada punto necesita unos 40-60 minutos.

4.1. Modelo con geometría sin deformaciones, con condiciones de operación no ideales

En este apartado se ha estudiado el diseño ideal del RFQ, es decir, el modelo con geometría sin deformaciones. La transmisión del RFQ cambia cuando los parámetros de operación se alejan de los de diseño. Por ello, se han obtenido los valores de transmisión del haz, para condiciones no ideales de la intensidad de entrada del haz, voltaje entre vanos, energía del haz de entrada y parámetros Courant-Snyder.

Primero se ha analizado el efecto de la intensidad del haz y del voltaje entre vanos sobre la transmisión. El aumento de intensidad del haz implica una mayor concentración de carga espacial (space charge) y mayor repulsión del haz, por lo que una gran parte de las partículas se pierden y la transmisión baja. Por otro lado, el voltaje entre vanos es proporcional a la fuerza neta de aceleración sobre el haz. Cuando el valor se aleja del de diseño (85 kV), la aceleración será menor o mayor por celda. Por lo tanto, las partículas podrían perder sincronismo con la onda de RF y bajaría la transmisión.

En la figura 4.1 se puede ver como cambian los valores de transmisión y transmisión a 3 MeV en función de la intensidad del haz y del voltaje entre vanos.

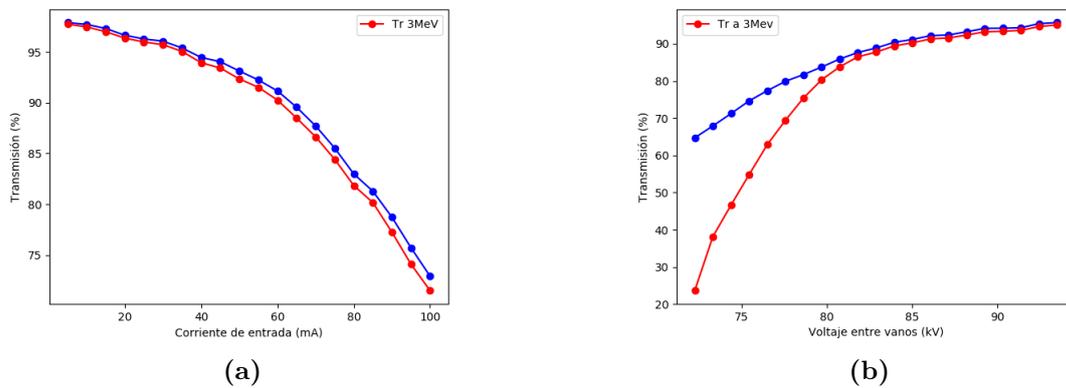


Figura 4.1: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

La transmisión baja de 90% a partir de 65 mA y en el caso del voltaje entre vanos baja rápidamente para valores por debajo de 83 kV. También se ve que un voltaje inferior al de diseño es más perjudicial para la transmisión (que un voltaje superior).

Tabla 4.2: Valores de transmisión para los valores de diseño de intensidad del haz y voltaje entre vanos.

I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
60.0	85.0	91.15	90.25	2.9675

Después se ha analizado el efecto de la energía del haz de entrada y parámetros Courant-Snyder sobre la transmisión. El parámetro alpha no parece muy determinante, ya que la transmisión se mantiene en un rango de 2 % (figura 4.2a). En cambio, alejarse del valor de diseño de beta, afecta gravemente la transmisión (figura 4.2b), por lo que debe estar bien definido en el haz de entrada. Estas características del haz de entrada pueden regularse cambiando los parámetros de operación del LEBT (sección previa al RFQ), modificando las características de enfoque mediante el campo magnético de los solenoides.

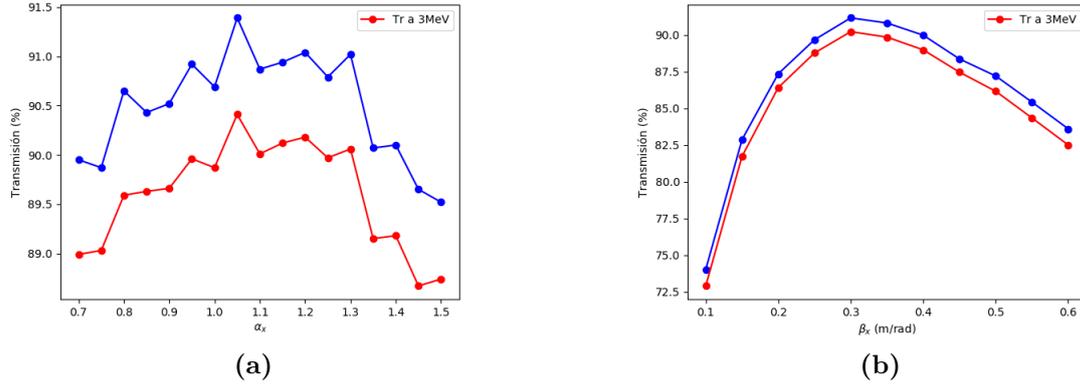


Figura 4.2: Transmisión en función de (a) α_x y (b) β_x .

La emitanza, al igual que el parámetro beta, es un parámetro determinante en la transmisión (figura 4.3a) y puede regularse con los solenoides del LEBT. Por último, la energía cinética del haz también es importante (figura 4.3b), ya que la longitud de las celdas del RFQ es proporcional a la velocidad de las partículas y si la energía se aleja del valor de diseño, las partículas pierden el sincronismo celda a celda y se perderán más partículas, bajando la transmisión.

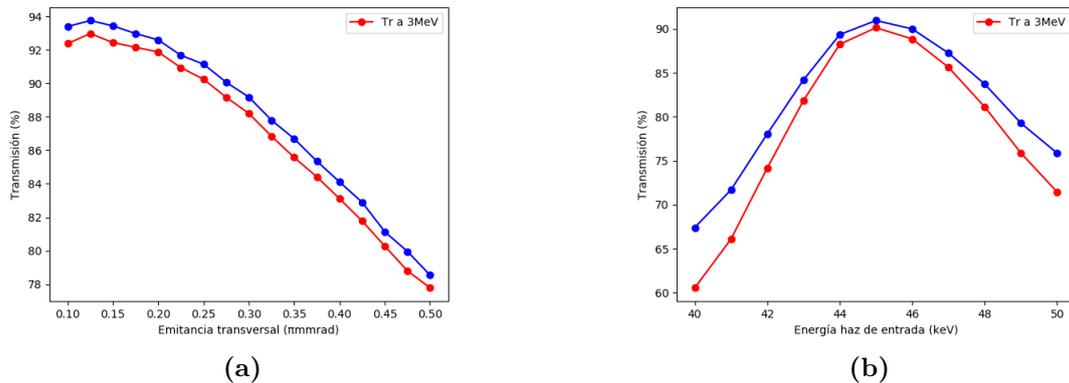


Figura 4.3: Transmisión en función de (a) la emitanza transversal y de (b) la energía del haz de entrada.

La máxima transmisión se da para $\alpha_x \simeq \alpha_y \simeq 1.05$. Los valores por debajo y hasta los valores asignados para la simulación $\alpha_x=1.139$ $\alpha_y=1.202$ son aceptables, ya que estos no están por debajo de 90 % de transmisión.

Tabla 4.3: Valor de α_x para el valor máximo de transmisión.

$\alpha_x \simeq \alpha_y$	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
1.05	91.35	90.55	2.9710
1.15	91.04	90.06	2.9645
1.2	91.12	90.18	2.9664

$\beta_x \simeq \beta_y \simeq 0.3$ m/rad es el valor que da la máxima transmisión.

Tabla 4.4: Valor de β_x para el valor máximo de transmisión.

$\beta_x \simeq \beta_y$ (m/rad)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
0.3	91.25	90.35	2.9683

La transmisión se mantiene por encima del 90 % para valores de emitancia por debajo de 0.25π mmmrad.

Tabla 4.5: Valor de la emitancia hasta el que la transmisión se mantiene por encima del 90 %.

ϵ (mmmrad)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
0.25	90.64	89.8	2.9696

En el caso de la energía de entrada, se da la transmisión máxima para 45 keV.

Tabla 4.6: Valor de la energía de entrada para el valor máximo de transmisión.

W (keV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
45	90.95	90.13	2.9698

4.2. Modelos con geometría deformada y condiciones de operación no ideales

En este apartado se han estudiado modelos del RFQ que se acercan más a la realidad, centrándose en cómo cambia la transmisión en condiciones no ideales de la intensidad del haz de entrada y del voltaje entre vanos. Estudiar estos casos es interesante por varias razones. Por una parte, la geometría no es exacta a la del diseño. Por otra parte, el campo eléctrico del RFQ, calculado como un problema electrostático, es una aproximación de la situación real, por lo que también se ha estudiado el modelo electromagnético.

En la práctica, el voltaje entre vanos no se puede aplicar directamente a los electrodos mediante una fuente de RF, ya que tecnológicamente no es posible mantener una tensión de 85 kV a 352.2 MHz en una estructura de más de tres metros largo. Por este motivo, el RFQ es una cavidad resonante, en el que la potencia de RF se introduce como una onda. Por lo tanto, la distribución real de los campos en la cavidad cambia, siendo el principal motivo la propia modulación del RFQ y el voltaje entre vanos no es constante $V(z) = V_0 = 85$ kV, sino que depende de la posición

$$V(z) = V_0 + V_{\text{perturbado}}(z).$$

Para corregir este efecto y regular la frecuencia de la cavidad, se introducen unos elementos de sintonización (“tuners” o sintonizadores) en la estructura del RFQ [24], que deben ajustarse de forma que el voltaje real entre vanos sea lo más parecido posible al de diseño $V(z) = V_0$, reduciendo $V_{\text{perturbado}}$ a cero. Ajustar la penetración de cada uno de estos “tuners” permite ajustar la distribución del campo magnético.

Por lo tanto, se distinguen varios casos en las simulaciones: el caso electrostático se refiere al cálculo con una diferencia entre vanos de exactamente $V_0 = 85$ kV y el caso electromagnético se refiere al cálculo con la distribución de campos real de la cavidad, obtenida mediante elementos finitos para determinadas configuraciones de los “tuners”.

Los campos obtenidos con los modelos electromagnéticos (más realistas) darán peores resultados de transmisión que el caso ideal o perfecto (electrostático). Estos estudios de transmisión sirven para calibrar cuánto debemos reducir las perturbaciones para obtener una transmisión aceptable en la estructura real.

4.2.1. 16 tuners uniformes

En esta sección se ha estudiado un modelo del RFQ con 16 “tuners” uniformes. Los “tuners” son una serie de tubos instalados en la pared exterior, a lo largo de cada sección del RFQ, en total hay 16 “tuners” (por cuadrante) a lo largo de la cavidad del RFQ. Este modelo se denomina con “tuners uniformes” porque todos los “tuners” tienen la misma longitud.

Primero se ha estudiado el caso electrostático.

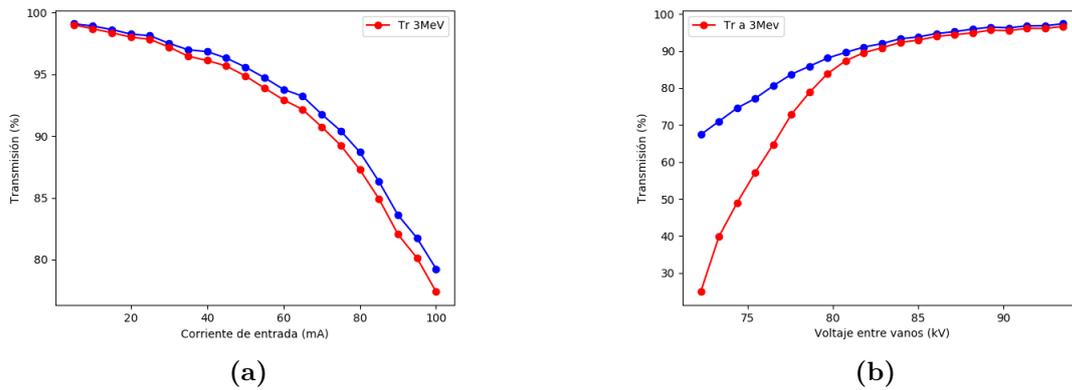
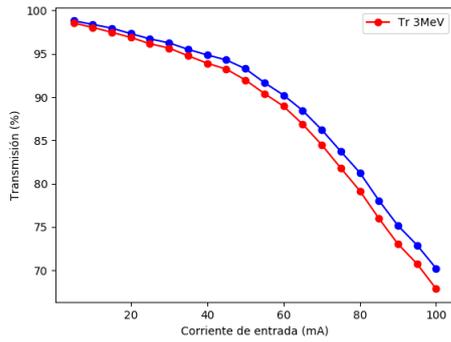
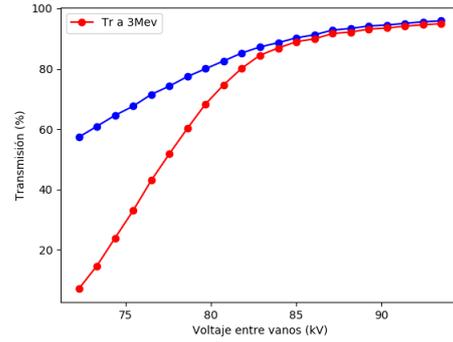


Figura 4.4: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Después, el caso electromagnético.



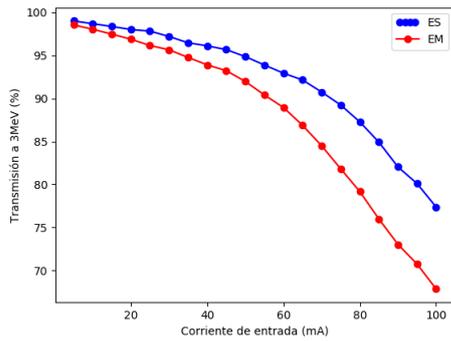
(a)



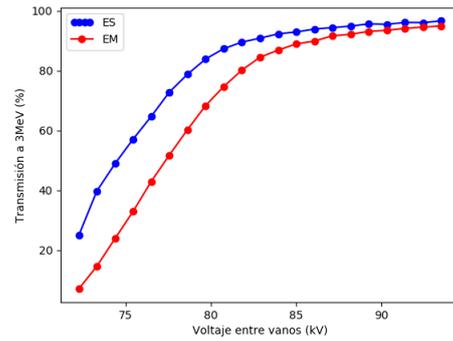
(b)

Figura 4.5: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

En las siguientes imágenes se ha comparado el modelo electrostático con el electromagnético.



(a)



(b)

Figura 4.6: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Los valores de transmisión a 3 MeV son ligeramente más bajos que 90% en el caso electromagnético. Como se puede ver los “tuners” no afectan demasiado a la transmisión.

Tabla 4.7: Comparación de los valores de transmisión para el caso electrostático y electromagnético para los valores de diseño.

	I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
ES	60.0	85.0	93.78	92.94	2.9661
EM	60.0	85.0	90.23	88.95	2.9481

4.2.2. Deformaciones en los vanos

En este apartado se ha estudiado cómo afectan las deformaciones de la punta de los electrodos a los valores de la transmisión. La fabricación del RFQ es muy complicada mecánicamente y las desviaciones en la geometría de la punta de los electrodos afecta a la distribución de los campos. En la figura 4.7 se puede ver como podría cambiar la geometría de la punta de los vanos respecto a la del diseño. Se ha estudiado cómo afecta la elongación de la punta de uno de los vanos y el estrechamiento simétrico de la punta de otro de los vanos, para diferentes valores de la deformación.

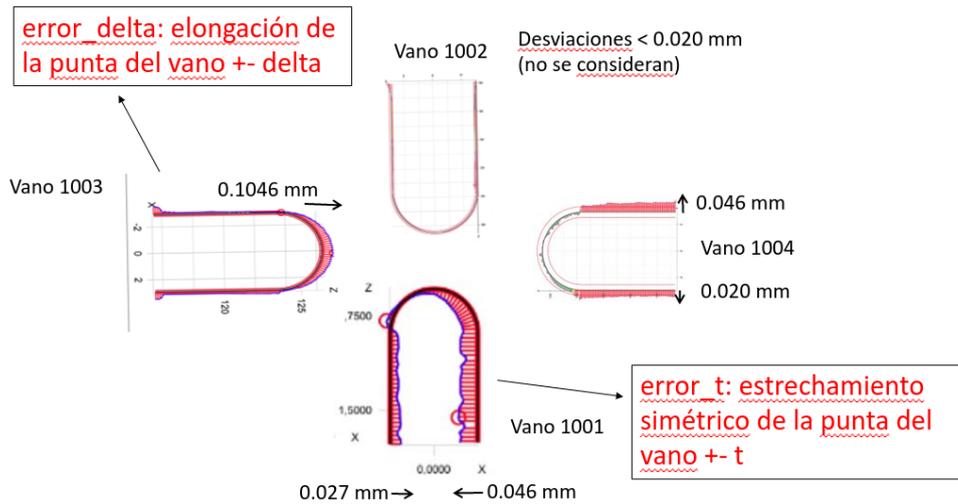


Figura 4.7: Posibles deformaciones que pueden darse en la geometría de los vanos de un RFQ. Estimaciones de J. L. Muñoz.

Comenzando por el caso del estrechamiento simétrico, primero se ha analizado el caso electrostático.

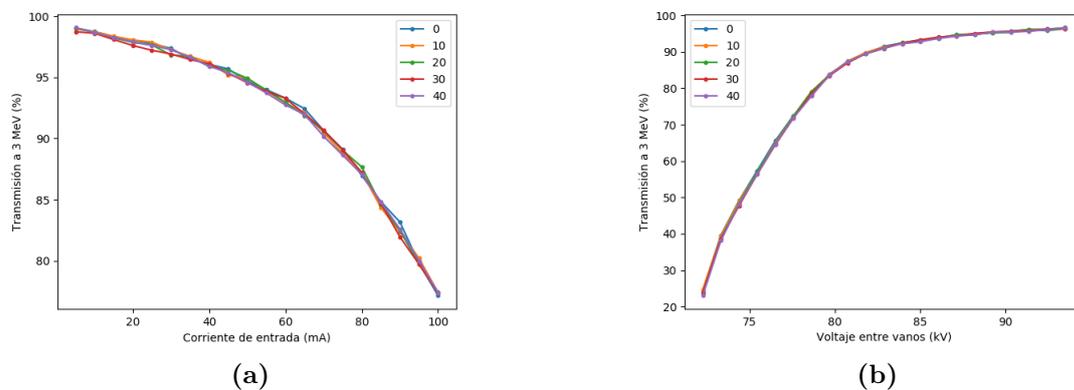


Figura 4.8: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Tabla 4.8: Valores de transmisión para los diferentes valores de estrechamiento simétrico de uno de los vanos, caso electrostático.

	I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
0 (μm)	60.0	85.0	94.4	93.3	2.9583
10 (μm)	60.0	85.0	93.91	92.91	2.9613
20 (μm)	60.0	85.0	93.87	92.95	2.9638
30 (μm)	60.0	85.0	94.04	93.28	2.9689
40 (μm)	60.0	85.0	93.82	92.74	2.9586

Después, el caso electromagnético.

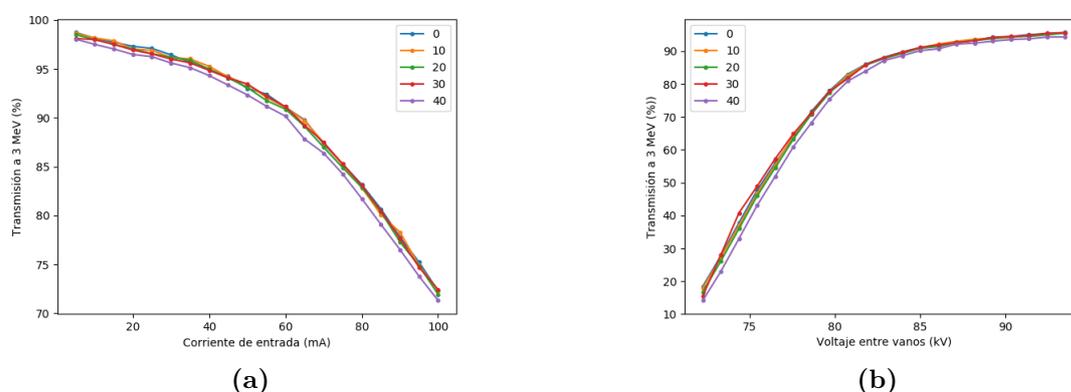


Figura 4.9: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Tabla 4.9: Valores de transmisión para los diferentes valores de estrechamiento simétrico de uno de los vanos, caso electromagnético.

	I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
0 (μm)	60.0	85.0	92.21	91.07	2.9545
10 (μm)	60.0	85.0	92.16	91.04	2.9546
20 (μm)	60.0	85.0	91.9	90.88	2.9571
30 (μm)	60.0	85.0	92.11	91.13	2.9584
40 (μm)	60.0	85.0	91.36	90.16	2.9512

Como se puede ver el estrechamiento simétrico de uno de los vanos no afecta apenas a la transmisión del haz y los valores se mantienen por encima del 90%, tanto en el caso electrostático como en el electromagnético.

Después, se ha estudiado el caso de la elongación de la punta de uno de los vanos para varios valores. Primero se ha analizado el caso electrostático.

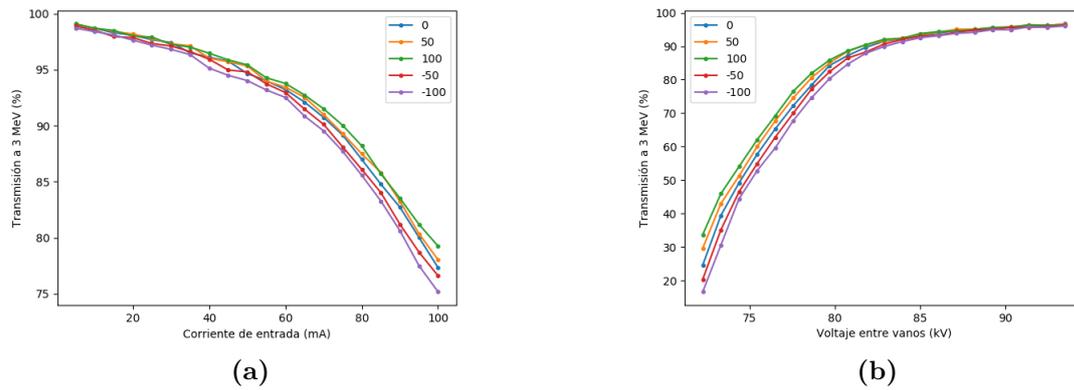


Figura 4.10: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Parece que los efectos de la deformación geométrica son más notorios a mayor intensidad del haz y menor voltaje entre vanos.

Tabla 4.10: Valores de transmisión para los diferentes valores de elongación de la punta de uno de los vanos, caso electrostático.

	I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
0 (μm)	60.0	85.0	94.23	93.23	2.9613
50 (μm)	60.0	85.0	94.32	93.44	2.9651
100 (μm)	60.0	85.0	94.69	93.77	2.9650
-50 (μm)	60.0	85.0	93.96	92.96	2.9610
-100 (μm)	60.0	85.0	93.56	92.52	2.9596

Después, el caso electromagnético.

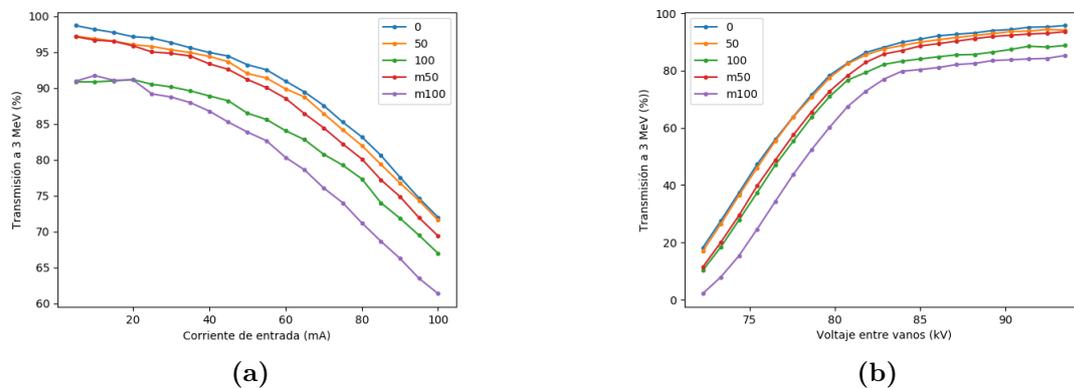


Figura 4.11: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Tabla 4.11: Valores de transmisión para los diferentes valores de elongación de la punta de uno de los vanos, caso electromagnético.

	I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
0 (μm)	60.0	85.0	92.03	90.99	2.9572
50 (μm)	60.0	85.0	91.11	89.91	2.9516
100 (μm)	60.0	85.0	85.26	84.08	2.9481
-50 (μm)	60.0	85.0	89.73	88.59	2.9522
-100 (μm)	60.0	85.0	81.66	80.36	2.9421

En este caso, la transmisión se ve afectada por valores más altos que $50\mu\text{m}$ y los valores de transmisión bajan hasta el 80 % en el modelo electromagnético.

Parece que los efectos de la elongación de la punta de los electrodos son más determinantes para la transmisión que los efectos del estrechamiento simétrico.

4.2.3. Unión entre segmentos

Por último, se ha estudiado cómo afecta la unión entre segmentos del RFQ a la transmisión del haz, en el caso electrostático. El RFQ está formado por cuatro segmentos de 800 mm que posteriormente se ensamblan, con un total de 3.1 metros de largo. La modulación de los vanos se diseña como una curva continua a lo largo de los 3.1 metros, pero las uniones entre los segmentos crean una discontinuidad que afecta a la distribución de los campos en la cavidad y por lo tanto, a la transmisión de las partículas. En el corte, la forma de los vanos se diseña con una geometría elíptica para compensar esto. Por todo esto, este caso requería mucho detalle en el modelo de elementos finitos. En la siguiente imagen, se ve el “gap” o espacio entre la unión de los segmentos:

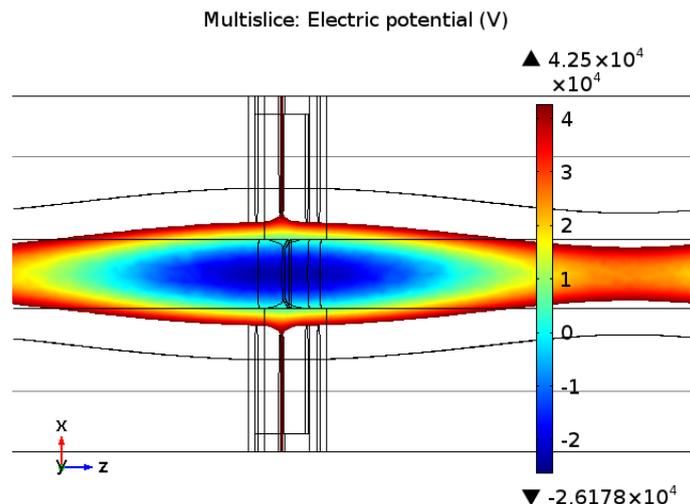


Figura 4.12: Unión entre dos segmentos del RFQ. J. L. Muñoz

Se ha estudiado el caso electrostático y se pueden ver los valores de la transmisión (figura 4.13) en el caso con discontinuidad entre segmentos y el caso sin deformación, en función de la intensidad del haz y del voltaje entre vanos.

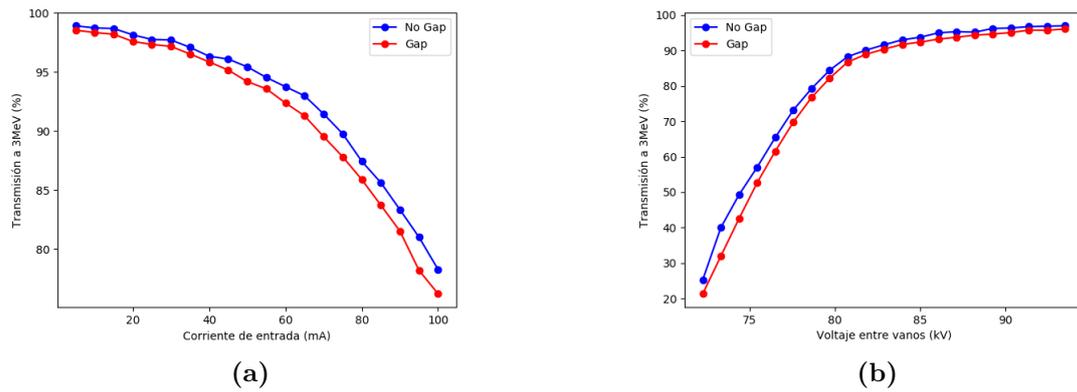


Figura 4.13: Transmisión en función de (a) la intensidad de entrada y (b) del voltaje entre vanos.

Como se puede ver no hay gran diferencia entre el modelo con “gap” y el modelo sin “gap” y los valores de transmisión se mantienen por encima del 90 %.

Tabla 4.12: Comparación de los valores de la transmisión para el caso con “gap” y sin “gap” para los valores de diseño.

	I (mA)	V (kV)	Tr (%)	Tr a 3MeV (%)	avgW (MeV)
Sin “gap”	60.0	85.0	94.71	93.75	2.9644
“Gap”	60.0	85.0	93.55	92.37	2.9553

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado, mediante técnicas de cálculo numérico de dinámica de haz, la estructura de aceleración de protones RFQ, que el consorcio público ESS-Bilbao está fabricando para sus instalaciones de Zamudio (Bizkaia). El objetivo de estos ha sido comprender y cuantificar el funcionamiento de este dispositivo en condiciones que difieran de las ideales de diseño, de forma que se puedan anticipar y preparar las acciones destinadas a optimizar el funcionamiento del mismo. Como se ha visto el RFQ es un acelerador ideal para acelerar haces de protones a baja energía como primera sección de aceleración.

A partir de los resultados de las simulaciones realizadas para los diferentes casos se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- La técnica combinada de cálculo numérico de elementos finitos junto con dinámica de haz, en este caso COMSOL y GPT, es una herramienta muy potente para entender el funcionamiento de una estructura tan compleja como un RFQ, genera resultados muy precisos y optimiza el tiempo de computación.
- En el caso del modelo sin deformaciones para condiciones no ideales se ha observado que la transmisión se mantiene por encima del 90 % para valores aproximados a los ideales de los parámetros de diseño. Por lo tanto, en caso de que los valores de entrada se desviaran de los de diseño, la ejecución del RFQ seguiría siendo adecuada.
- Se han estudiado tres modelos con deformaciones: 16 “tuners” uniformes, deformaciones de los vanos y unión entre segmentos.

-En el caso del estudio de los “tuners”, los valores de transmisión del haz se mantienen por encima del 90 % tanto en el caso electrostático como en el electromagnético.

-En cuanto a las deformaciones de los vanos, se ha visto que el estrechamiento simétrico de la punta no ha afectado a los valores de transmisión del haz. En cambio, al estudiar el caso de la elongación de la punta se ha visto que valores de deformación mayores a 50 μm , en el caso electromagnético, disminuyen los valores de transmisión hasta un 80 %.

-Por último, se ha estudiado el caso de unión entre segmentos, donde los valores de transmisión no se ven afectados y superan el 90 % de transmisión.

Los cálculos realizados y los resultados obtenidos en este trabajo, contribuirán al adecuado sintonizado, ajuste y operación del RFQ de ESS-Bilbao.

Bibliografía

- [1] P. Lebrun, “Particle accelerators, instruments of discovery in physics”, Cern Accelerator School Vysoke, (2019).
- [2] P. J. Bryant, “A brief history and review of accelerators”, “CAS-CERN Accelerator School : 5th General Accelerator Physics Course, Jyvaskyla”, CERN-94-01, Geneva, (1994), pág 1.
- [3] T. P. Wangler, “RF Linerar Accelerators”, Wiley-VCH, Weinheim, (2008), págs. 232-251.
- [4] A. Lombardi, “The Radio Frequency Quadrupole (RFQ)”, “CAS-CERN Accelerator School: Small Accelerators, Zeegse”, CERN-2006-012, Geneva, (2006), pág. 201.
- [5] European Spallation Source, URL: <https://europeanspallationsource.se/>
- [6] I. Garcia, “Viaje de prensa al interior de una fuente de neutrones”, Asociación Española de Comunicación Científica, (2018), URL: <https://www.aecomunicacioncientifica.org/viaje-de-prensa-al-interior-de-una-fuente-de-neutrones-ismaelgh/>
- [7] J. L. Muñoz, I. Bustinduy, I. Rueda y D. de Cos. “Development of the radio frequency quadrupole proton linac for ESS-Bilbao”, EPJ Web of Conferences 231, 02001, (2020).
- [8] Z. Izaola, I. Bustinduy, J. Corres, D. de Cos, C. de la Cruz, G. Harper, R. Miracoli, J. L. Muñoz, I. Rueda, A. Vizcaino y A. Zugazaga, “Advances in the development of the ESS-Bilbao proton injector”, (2016).
- [9] S. Jolly, M. Easton, S. Lawrie y más, “Novel integrated design framework for radio frequency quadrupoles”, Elsevier B.V., (2013)
- [10] Y. Levinsen, R. De Prisco, M. Eshraqi y más, “Beam dynamics of the ESS Linac”, ESS, Lund, (2018).
- [11] C. Rossi, P. Bourquin, S. Cazaux, O. Delferriere y más, “The Radiofrequency quadrupole accelerator for the LINAC 4”, Geneva y Saclay, (2008).
- [12] M. Weiss, “Radio Frequency Quadrupole”, “CAS-CERN Accelerator School: 5th Advanced Accelerator Physics Course, Rhodes”, CERN-95-06, Geneva, (1995), Vol. II, pág. 959-974.

- [13] A. Kriesch, 2006 (UTC) (also de:Benutzer:Akriesch), CC BY 2.5, URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=704260>
- [14] M. Abramowitz, I. A. Stegun, “Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables”, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, (1964).
- [15] F. Tecker, “Longitudinal dynamics”, Cern Accelerator School: Basics of Accelerator Physics and Technology, Archamps, (2019).
- [16] E. Wilson, “Transverse beam dynamics”, “CAS-CERN Accelerator School: Intermediate accelerator physics, Zeuthen”, CERN-2006-002, Geneva (2006), pág. 1-5.
- [17] E. Bravin, “Transverse Emittance Measurement”, Cern Accelerator School on Beam Instrumentation, (2018).
- [18] H. Braun, “Emittance Diagnostics”, Cern Accelerator School on Beam Diagnostics, (2008).
- [19] I. Bustinduy y J. L. Muñoz, “Technical Design Report: ESS-BILBAO RFQ”, (2015), 2.2.
- [20] S. B. van der Geer y M. J. de Loos, “General Particle Tracer, User Manual”, Version 2.83, 1.8.
- [21] K. Schindl, “Space Charge”, “CAS-CERN Accelerator School: Intermediate accelerator physics, Zeuthen”, CERN-2006-002, Geneva, (2006), pág. 305.
- [22] J. Barnes y P. Hut, “A hierarchical $O(N \log N)$ force-calculation algorithm”, Nature, Vol. 324, (1986).
- [23] I. Bustinduy y J. L. Muñoz, “Technical Design Report: ESS-BILBAO RFQ”, (2015), 10.3.
- [24] T. P. Wangler, “RF Linerar Accelerators”, Wiley-VCH, Weinheim, (2008), 8.16.