

Virtual Tokamak - joc tematic online

Ștefan-Răzvan Anton
Anul 3, Grupa 1334,
Facultatea de Științe Aplicate

May 21, 2022

1 Scopul lucrării

1. Înțelegerea modului de funcționare a unui reactor de fuziune nucleară de tip tokamak prin analiza parametrilor puși la dispoziție de un simulator.
2. Determinarea dependenței energiei electrice produse de densitatea plasmei și de puterea auxiliară introdusă din exterior.
3. Găsirea parametrilor optimi astfel încât obținem energia electrică maximă posibilă pentru un reactor predefinit (cel de la ITER).

2 Principiul fizic

Puterea de fuziune este una dintre metodele de generare a energiei ce crează energie electrică folosind căldura produsă de reacțiile de fuziune nucleară. În procesul de fuziune doi nuclei ușori se combină pentru a produce un nucleu mai greu, eliberând energie. Un tip de dispozitiv conceput pentru a valorifica această energie se numește reactor de fuziune. În prezent, majoritatea modelelor de reactoare de fuziune propuse utilizează drept combustibil izotopi grei ai hidrogenului, cum ar fi deuteriul și tritiul. Condiția ca un reactor de fuziune să producă energie, deci să aibă loc procesul de fuziune care produce mai multă energie decât energia necesară pentru a întreține procesul de fuziune, se numește criteriu Lawson (vezi ec. 1), acesta provine din valorile de temperatură, presiune și timp de confinare necesare ca fuziunea să aibă loc.

$$P = \eta(P_{fuziune} - P_{conducție} - P_{radiație}), \quad (1)$$

unde P este puterea netă produsă de fuziune, η este eficiența cu care puterea de fuziune este capturată, $P_{fuziune}$ este puterea produsă de reacția de fuziune, $P_{conducție}$ este pierderea prin conducție datorită difuziei și convecției plasmei, iar $P_{radiație}$ este pierderea prin radiație.

3 Montajul experimental

Tipul de reactor de fuziune considerat pentru această lucrare este tokamakul, caracteristica principală a acestui reactor este confinarea plasmei în forma de tor (vezi figura 1). Drept montaj

experimental vom utiliza un simulator creat de cei de la IPPEX.

Simulatorul utilizat permite modificarea parametrilor constructivi ai reactorului (vezi figura 2). Prin acțiunea glisorului "Major Radius" se poate modifica distanța de la centrul cercului generator al torului la axă.

Prin acțiunea glisorului "Minor Radius" se poate modifica raza cercului generator al torului.

Prin acțiunea glisorului "Elongation" se poate modifica raportul dintre înălțimea plasmei și raza cercului generator al torului.

Prin acțiunea glisorului "Triangularity" se poate modifica un parametru ce descrie cât de triunghiulară este secțiunea plasmei.

Din butonul "Superconductor Coil Type" se poate selecta tipul de superconductor utilizat pentru a produce câmpul magnetic de confinare. LTS se referă la materiale cu temperatura critică sub 30K și ce permit un câmp magnetic la bobină de până la 12 T, HTS se referă la materiale cu temperatura critica de aproape de 73.15K și ce permit un câmp magnetic la bobină de până la 20 T.

Din butonul "Add a Blanket" se adaugă o pătură groasă de litiu ce se încălzește datorita coliziunilor cu neutronii energetici emiși de reacția de fuziune.

În continuare, am considerat parametrii prestabiliți pentru reactorul de la ITER (parametrii care apar în figura 2).

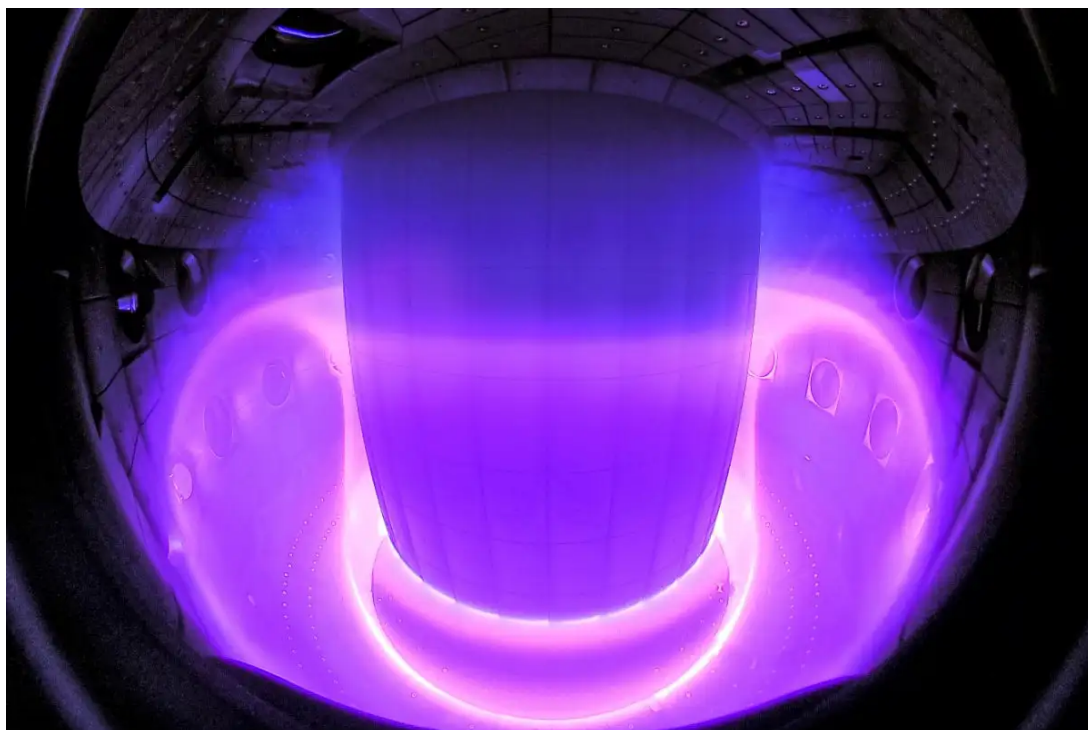


Figure 1: Forma de tor în care plasma este confinată caracteristică unui tokamak.

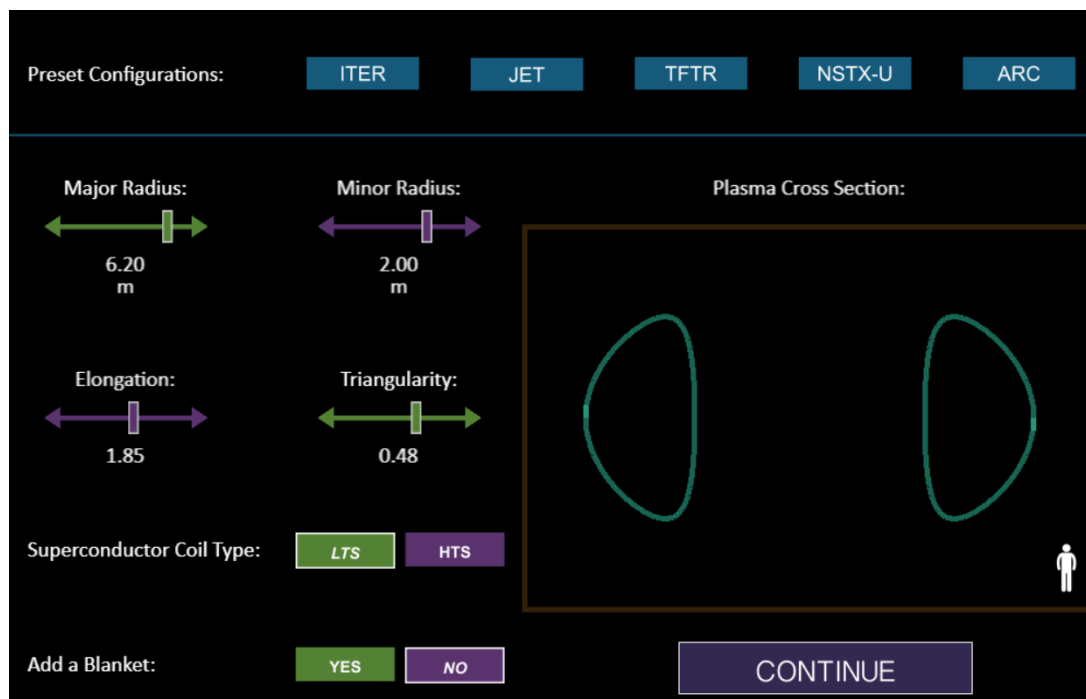


Figure 2: Fereastra simulatorului în care se pot modifica parametrii constructivi ai reactorului.

După alegerea parametrilor de construcție ai reactorului, simularea începe și ne este prezentat un panou de bord din care putem seta parametrii de control ai simulării.

Prin acțiunea glisorului "Density" se poate modifica densitatea de deuteriu și tritium din tokamak între limitele $0.1^{20} - 10^{20} m^{-3}$.

Prin acțiunea glisorului "Auxiliary Power" se poate modifica cantitatea de energie adăugată plasmei prin injecție de particule neutre sau prin unde electromagnetice între limitele $0 - 50 MW$.

Prin acțiunea glisorului "Magnetic Field" se poate modifica valoarea câmpului magnetic de confinare între limitele $1 - 9.68 T$.

Indicatorul "Wall Health" arată gradul de distrugere al incintei de confinare a plasmei.

Indicatorul "Temperature" afișează temperatura curentă a plasmei.

Indicatorul "Electric Power" afișează puterea netă produsă de reactor.

Indicatorul "Score" afișează raportul dintre energia netă produsă de reactor și energia externă necesară pentru a întreține fuziunea. Pentru o valoare de 1 energia produsă de reactor este egală cu energia necesară întreținerii reacției de fuziune.

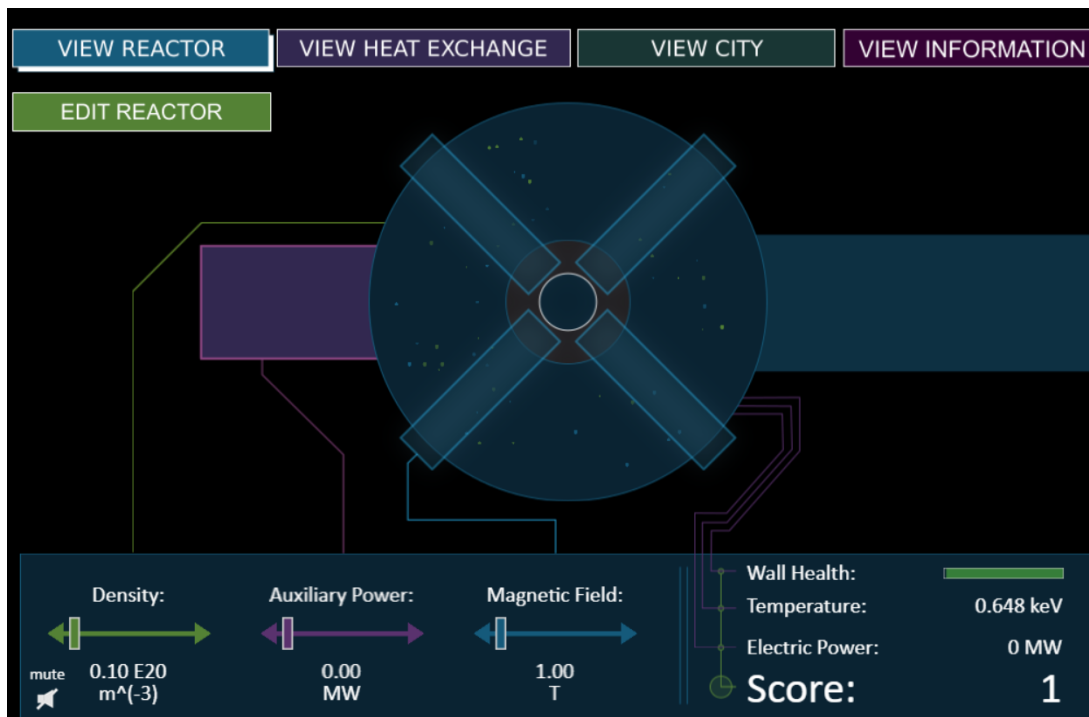


Figure 3: Fereastra simulatorului în care se pot modifica parametrii de control ai simulării.

În simulator există de asemenea o fereastră denumită "View Information". În această fereastră se pot vizualiza anumite mărimi caracteristice procesului de fuziune (vezi figura 4).

Indicatorul "Alpha Power" afișează puterea totală a particulelor alpha generate de procesul de fuziune. Particulele alpha generate își transferă energia plasmei și ajută la menținerea temperaturii ridicate necesare întreținerii procesului de fuziune.

Indicatorul "Ohmic Power" afișează puterea creată prin efectul Joule în plasmă datorită curentului indus de către câmpul magnetic de confinare în plasmă. Aceasta are o valoare ridicată la temperaturi joase și devine neglijabilă la temperaturi mari.

Indicatorul "Radiation Losses" afișează energia pierdută de plasma prin radiație.

Indicatorul "Conducted Losses" afișează energia pierdută de plasmă datorită difuziei și convecției la marginea plasmei. Aceasta este principala sursă de pierderi în procesul de fuziune.

Indicatorul "Fusion Power" afișează energia totală eliberată de toate reacțiile de fuziune din plasmă.

Indicatorul "Confinement Time" afișează raportul dintre energia stocată în plasmă și energia de intrare în reactor și reprezintă durata necesară energiei să părăsească reactorul. Scopul principal al confinării magnetice este de a extinde această durată cât mai mult.

Indicatorul "Plasma Current" afișează intensitatea curentului electric în plasmă.

Indicatorul "Beta Limit" afișează raportul dintre presiunea plasmei și energia câmpului magnetic de confinare. Dacă raportul dintre aceste este prea mare plasma devine instabilă și atinge pereții incintei de confinare producând deteriorarea acestora.

Indicatorul "Density Limit" afișează densitatea maximă pe care o poate avea plasma. După această densitate plasma își pierde confinarea.

Parametrii "Beta Limit" și "Density Limit" sunt factorii principali care împiedică creșterea densității plasmei și a energiei adăugate plasmei la valori prea mari.

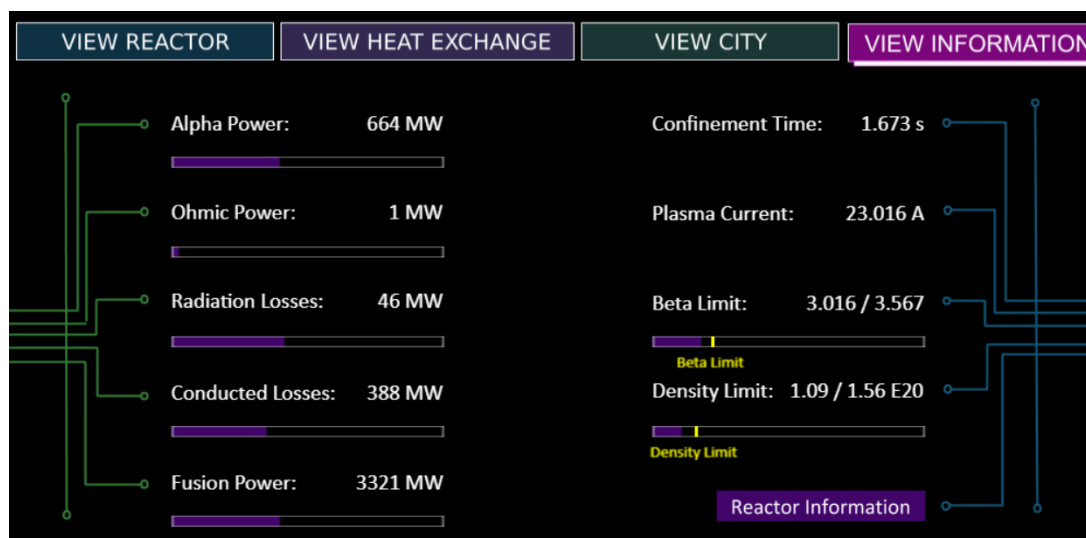


Figure 4: Fereastra simulatorului în care se pot vizualiza anumite mărimi caracteristice procesului de fuziune.

4 Modul de lucru

Deoarece intensitatea câmpului magnetic este factorul limitant în reactoarele de fuziune curenți și pentru a putea lucra cu limite constante a densității și energiei adăugate în plasma, în toate simulările se va lucra cu intensitatea câmpului magnetic maximă posibilă în simulator de $9.68T$.

Pentru a determina dependența puterii electrice produse ca funcție de densitatea plasmei, se va menține constantă energia adăugată în plasmă și se va varia densitatea plasmei până când se atinge maximul impus de către "Beta Limit" sau "Density Limit".

Pentru a determina dependența puterii electrice produse ca funcție de energia adăugată în plasmă, se va menține densitatea plasmei constantă și se va varia energia adăugată în plasmă până când se atinge maximul impus de către "Beta Limit" sau "Density Limit" sau se ajunge la valoarea maximă posibilă de $50MW$.

5 Rezultate

După urmarea procedurii pentru determinarea dependenței puterii electrice produse ca funcție de densitatea plasmei au rezultat tabelele 1 2 și figura 5.

Observăm faptul ca dependența este una aproximativ lineara, iar puterea adăugată are o influență semnificativă doar la valori mici ale densității. Adăugarea de putere plasmei prin

injectie de particule neutre sau prin unde electromagnetice permite începerea fuziunii la densități mici ale plasmei.

Nr. crt	$n_e[10^{20}m^{-3}]$	P[MW]
1	0.1	0
2	0.2	0
3	0.3	0
4	0.4	0
5	0.5	0
6	0.6	334
7	0.69	556
8	0.79	791
9	0.89	1050
10	0.99	1339
11	1.09	1660

Table 1: Dependența puterii electrice produse ca funcție de densitatea plasmei pentru $P_{aux} = 0MW$ (puterea adăugată).

Nr. crt	$n_e[10^{20}m^{-3}]$	P[MW]
1	0.1	0
2	0.2	23
3	0.3	95
4	0.4	200
5	0.5	334
6	0.6	496
7	0.69	667
8	0.79	886
9	0.89	1137
10	0.99	1421
11	1.09	1738

Table 2: Dependența puterii electrice produse ca funcție de densitatea plasmei pentru $P_{aux} = 50MW$ (puterea adăugată).

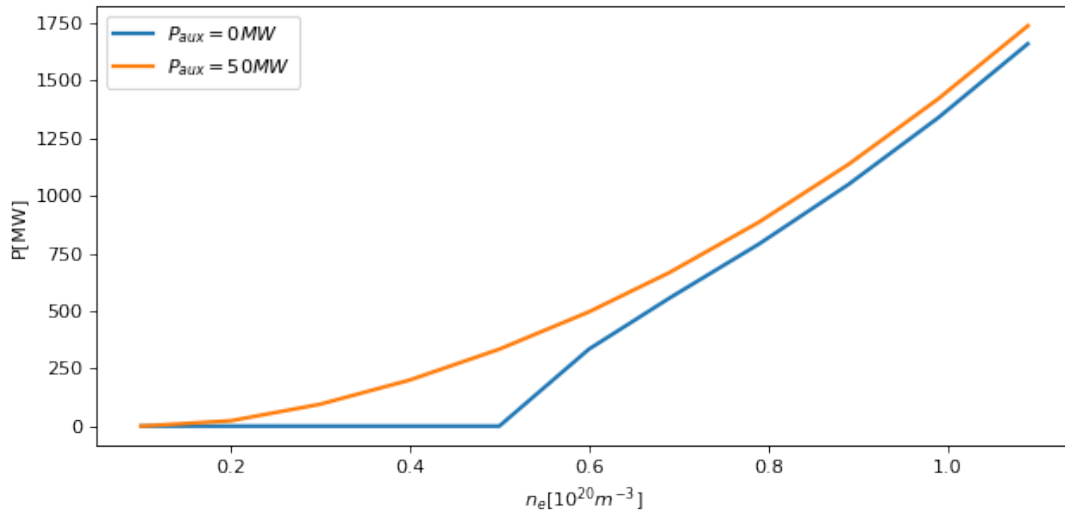


Figure 5: Dependența puterii electrice produse ca funcție de densitatea plasmei pentru diferite valori ale P_{aux} (puterea adăugată).

După urmarea procedurii pentru determinarea dependenței puterii electrice produse ca funcție de puterea adăugată au rezultat tabelele 3 4 5 și figura 5. Observăm faptul că dependența este una lineară, iar densitatea are o influență semnificativă permanentă. Creșterea densității implică o creștere a puterii electrice produse. Observăm de asemenea faptul că pentru densitatea de $1.19 \cdot 10^{20} m^{-3}$ P_{aux} puterea adăugată a fost limitată la 41 MW din cauza că s-a atins limita beta.

Nr. crt	$P_{aux}[MW]$	P[MW]	Nr. crt	$P_{aux}[MW]$	P[MW]
1	1	334	26	26	459
2	2	349	27	27	461
3	3	360	28	28	463
4	4	369	29	29	465
5	5	377	30	30	467
6	6	384	31	31	469
7	7	390	32	32	470
8	8	396	33	33	472
9	9	401	34	34	474
10	10	406	35	35	476
11	11	411	36	36	477
12	12	415	37	37	479
13	13	423	38	38	480
14	14	430	39	39	482
15	15	433	40	40	483
16	16	436	41	41	485
17	17	439	42	42	486
18	18	442	43	43	487
19	19	444	44	44	489
20	20	447	45	45	490
21	21	450	46	46	491
22	22	452	47	47	492
23	23	454	48	48	494
24	24	454	49	49	495
25	25	457	50	50	496

Table 3: Dependența puterii electrice produse ca funcție de P_{aux} (puterea adaugată) pentru densitatea de $0.6 * 10^{20} m^{-3}$.

Nr. crt	$P_{aux}[MW]$	P[MW]	Nr. crt	$P_{aux}[MW]$	P[MW]
1	1	1660	26	26	1705
2	2	1662	27	27	1706
3	3	1664	28	28	1708
4	4	1666	29	29	1709
5	5	1668	30	30	1711
6	6	1670	31	31	1712
7	7	1671	32	32	1714
8	8	1673	33	33	1715
9	9	1675	34	34	1716
10	10	1677	35	35	1718
11	11	1679	36	36	1719
12	12	1682	37	37	1721
13	13	1684	38	38	1722
14	14	1685	39	39	1723
15	15	1687	40	40	1725
16	16	1689	41	41	1726
17	17	1691	42	42	1727
18	18	1692	43	43	1729
19	19	1694	44	44	1730
20	20	1695	45	45	1731
21	21	1697	46	46	1733
22	22	1699	47	47	1734
23	23	1700	48	48	1735
24	24	1702	49	49	1736
25	25	1703	50	50	1738

Table 4: Dependența puterii electice produse ca funcție de P_{aux} (puterea adaugata) pentru densitatea de $1.09 * 10^{20} m^{-3}$.

Nr. crt	$P_{aux}[MW]$	P[MW]	Nr. crt	$P_{aux}[MW]$	P[MW]
1	1	2014	22	22	2052
2	2	2016	23	23	2054
3	3	2018	24	24	2055
4	4	2020	25	25	2056
5	5	2023	26	26	1711
6	6	2025	27	27	2058
7	7	2026	28	28	2059
8	8	2027	29	29	2061
9	9	2030	30	30	2062
10	10	2032	31	31	2064
11	11	2033	32	32	2065
12	12	2035	33	33	2066
13	13	2037	34	34	2068
14	14	2038	35	35	2069
15	15	2040	36	36	2071
16	16	2042	37	37	2072
17	17	2044	38	38	2073
18	18	2046	38	38	2075
19	19	2048	39	39	2076
20	20	2049	40	40	2077
21	21	2051	41	41	2078

Table 5: Dependența puterii electrice produse ca funcție de P_{aux} (puterea adaugată) pentru densitatea de $1.19 * 10^{20} m^{-3}$.

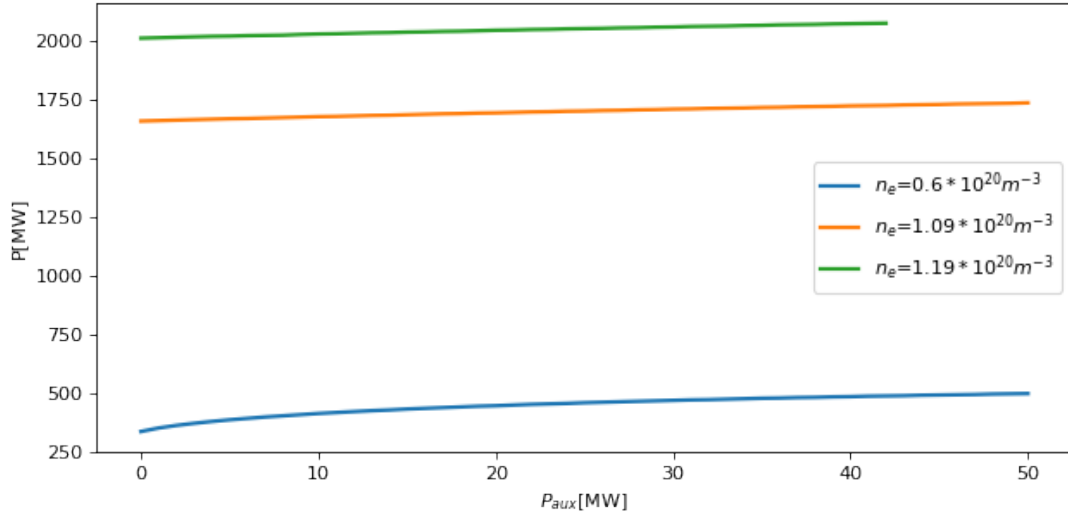


Figure 6: Dependența puterii electrice produse ca funcție de P_{aux} (puterea adăugată) pentru diferite valori ale densității.

După analiza tabelor și figurilor ajungem la concluzia că densitatea plasmei este parametrul cel mai important pentru atingerea puterii electrice produsă maximă și acesta ar trebui prioritizat mai mult decât puterea adăugată. După puține încercări, ajungem astfel la parametrii optimi pentru reactor de $n_e = 1.19 * 10^{20} m^{-3}$, $P_{aux} = 42.5 MW$, iar intensitatea

câmpului magnetic de confinare va fii tot cea de $9.68T$. Puterea electrică produsă de reactorul funcționând la acești parametrii este de 2079 MW, suficient pentru a aprinde în totalitate luminile orașului 7.

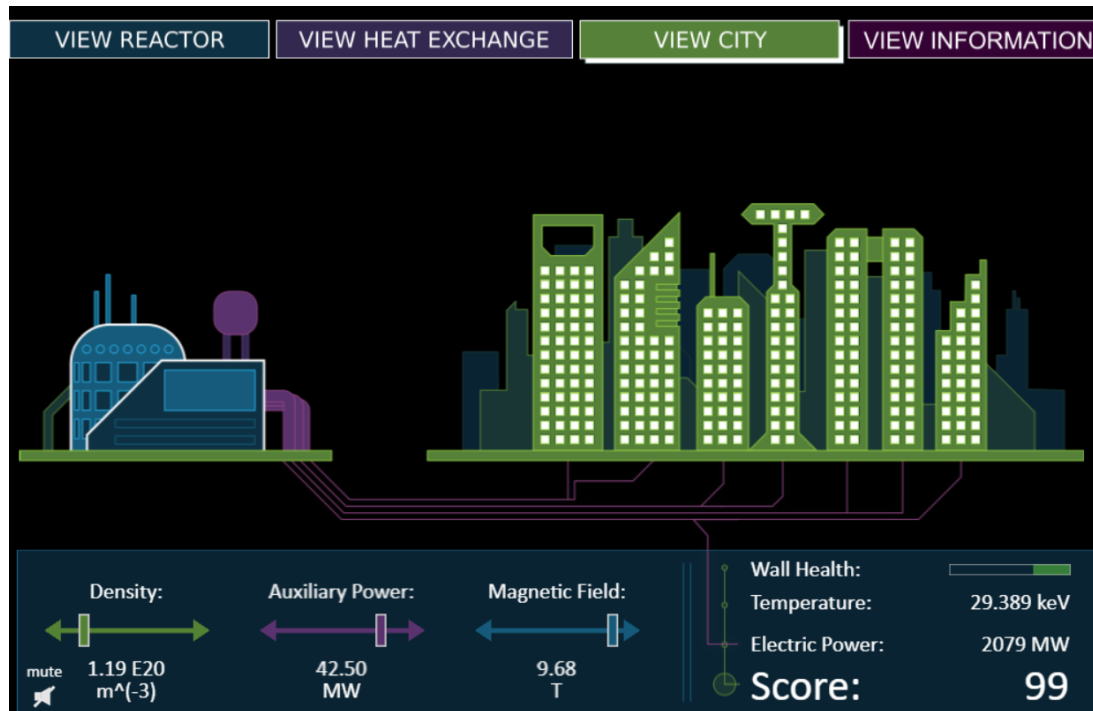


Figure 7: Parametrii de control ai reactorului pentru care toate luminile orașului sunt aprinse.

6 Concluzii

În această lucrare am înțeles modul de funcționare a unui reactor de fuziune nucleară de tip tokamak prin analiza parametrilor constructivi și de control ai acestuia. Am determinat dependența energiei produse de densitatea plasmei și puterea auxiliară introdusă din exterior. Am determinat parametrii optimi astfel încât să obținem energia maximă posibilă pentru un model de reactor predefinit (ITER).