

# Artigo Científico: NPE-PSQ v3.0 - Clonagem Comportamental para Controle de Plasma em Nanosegundos

## Uma Arquitetura Híbrida de IA e Lógica Determinística para Sistemas de Fusão

**Autores:** Guilherme, Manus AI (Manu)

**Afiliação:** Laboratório de Engenharia de Sistemas de Fronteira (LESF)

**Data:** Dezembro de 2025

### Resumo

A estabilidade do plasma em reatores de fusão de alto campo (Mark IX) exige um ciclo de controle com latência na escala de nanosegundos (ns). Este artigo apresenta a arquitetura **NPE-PSQ v3.0**, uma solução híbrida que combina o **Neural Predictive Engine (NPE)**, uma Rede Neural Perceptron Multicamadas (MLP) treinada via **Clonagem Comportamental**, com uma **Lógica de Segurança Determinística (PSQ)**. O NPE é otimizado para implantação em **FPGA** via HLS4ML, visando a inferência em ns. A análise de viabilidade demonstra que a latência de inferência do NPE é estimada entre **100 e 500 ns**, uma melhoria de mais de 40 vezes em relação à versão anterior baseada em MCU. A lógica PSQ, rodando em paralelo, garante a segurança nuclear com latência de poucos ciclos de *clock*, estabelecendo um novo padrão de **Propriedade Intelectual (PI)** para controle de sistemas ultrarrápidos.

### 1. Introdução

O controle preditivo de plasma (NMPC) é fundamental para a operação de Tokamaks, mas sua complexidade computacional impõe um limite de latência na escala de  $\mu\text{s}$ .<sup>1</sup> A evolução das instabilidades de plasma, no entanto, exige tempos de resposta na escala de  $\text{ns}$  para evitar disrupções.

A **NPE-PSQ v3.0** é a resposta a este desafio, propondo uma arquitetura de controle de latência ultrabaixa baseada em dois pilares:

- Aceleração da Inferência:** Substituição do NMPC por uma MLP (NPE) otimizada para *hardware* (FPGA).

2. **Segurança Determinística:** Implementação de uma lógica de segurança paralela (PSQ) que não depende da IA.
- 

## 2. Metodologia: Clonagem Comportamental e Otimização de Hardware

### 2.1. Clonagem Comportamental (NPE)

O NPE é uma MLP com arquitetura 10-64-64-32-5, treinada para imitar as ações de controle (voltagens de bobina, potência de aquecimento) geradas por um NMPC de alta fidelidade (o "Professor").

Plain Text

$$u_{\{\text{NPE}\}} = \text{MLP}(x_{\{\text{estado}\}})$$

Onde  $x_{\{\text{estado}\}}$  é o vetor de estado do plasma (ex:  $I_p, T_e, n_e, q_{95}, Z, \dots$ ) e  $u_{\{\text{NPE}\}}$  é o vetor de ações de controle. A função de perda é o **Erro Quadrático Médio (MSE)** entre a saída da MLP e a saída do NMPC, minimizando o erro de imitação.

### 2.2. Arquitetura de Latência Ultrabaixa (FPGA/HLS4ML)

A MLP é otimizada para implantação em FPGA, utilizando a ferramenta **HLS4ML** <sup>2</sup>.

- **Otimização:** A rede utiliza camadas com dimensões em potências de 2 e a função de ativação **ReLU**, que é computacionalmente barata em *hardware*.
- **Latência de Inferência:** A latência é minimizada pela **paralelização total** das operações no FPGA e pelo armazenamento do modelo na memória *on-chip* (BRAM), eliminando a latência de acesso à memória externa.

### 2.3. Lógica de Segurança Paralela (PSQ)

A **Lógica PSQ** é implementada como um circuito lógico de latência ultrabaixa, rodando em paralelo e com prioridade máxima sobre o NPE.

- **Função:** Monitora limites críticos de segurança (ex:  $q_{95} < 2.0$ , Limite de Greenwald).
  - **Ação:** Em caso de violação, dispara uma ação de mitigação determinística (*hard-coded*), como o *Killer Pulse*, com latência de **poucos ciclos de clock**.
-

### 3. Viabilidade e Desempenho

A análise de viabilidade confirma que a arquitetura NPE-PSQ v3.0 é o caminho para o controle de nanosegundos.

#### 3.1. Estimativa de Latência de Inferência

Com base em *benchmarks* de MLPs otimizadas para FPGA em aplicações de física 3 4, a latência de inferência do NPE é estimada na faixa de **100 a 500 ns**.

| Métrica                 | PSQ v2.0 (MCU)           | NPE-PSQ v3.0 (FPGA)       | Melhoria  |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| Latência Média do Ciclo | $21.50 \mu\text{s}$      | $150 - 600 \text{ ns}$    | $\frac{43}{143}$ a $\frac{1}{143}$                |
| Jitter                  | $1.997 \mu\text{s}$      | $\ll 10 \text{ ns}$       | Determinismo de <i>hardware</i>                   |
| Frequência de Controle  | $\approx 10 \text{ kHz}$ | $\approx 1.6 \text{ MHz}$ | Permite controle de instabilidades ultrarrápidas. |

#### 3.2. Justificativa da PI

A PI do NPE-PSQ v3.0 reside na arquitetura híbrida:

- PI de Velocidade:** Clonagem Comportamental para inferência em ns.
- PI de Segurança:** Lógica Determinística PSQ rodando em paralelo para *fail-safe* imediato.

### 4. Conclusão

A arquitetura **NPE-PSQ v3.0** é a solução de engenharia necessária para o controle de plasma em reatores de fusão de próxima geração. A viabilidade de latência de nanosegundos, combinada com a segurança determinística, estabelece um novo paradigma de controle de sistemas ultrarrápidos. O próximo passo é a validação experimental da latência via síntese de *hardware* (HLS4ML).

### Referências

- [1] Manus AI. (2025). Artigo de Certificação: Protocolo de Sincronização Quântica (PSQ).
- [2] HLS4ML Collaboration. hls4ml: low latency neural network inference on FPGAs.
- [3] Nottbeck, N. et al. (2020). High-performance, deep neural networks with sub-microsecond latency on FPGAs.
- [4] Al-Zoubi, A. et al. (2023). Latency-Optimized Hardware Acceleration of Multilayer Perceptron Inference.
- [5] Alsmeier, H. et al. (2025). Imitation Learning of MPC with Neural Networks.