



Princípios de Sincronização de Sistemas TDD

Atualização Janeiro 2021

Agência Nacional de Telecomunicações
Superintendência de Outorga e Recursos à Prestação
Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão



1. Contextualização

Este documento visa apresentar os princípios de sincronização de sistemas de comunicação que fazem uso do método de duplexação por divisão de tempo (do inglês, *Time Division Duplex - TDD*), doravante referidos como sistemas TDD. Tais princípios resultam de estudos e análises técnicas provenientes de referências nacionais e internacionais, além da análise dos subsídios fornecidos pela sociedade quando da realização da Consulta Pública nº 60, de 10 de julho de 2020, sobre as possíveis soluções regulatórias na sincronização entre sistemas TDD, bem como sobre os métodos de mitigação de interferências em regiões de fronteira nacional e internacional.

Um dos princípios adotados pela Anatel, quanto aos aspectos técnico-regulatórios relativos à sincronização de sistemas TDD, é o de incentivar a autorregulação no lugar de se estabelecer diretrizes para regular todos os aspectos da sincronização entre os sistemas. Portanto, conforme já informado em outras ocasiões, a Agência estimula as operadoras a coordenarem os sistemas TDD e atuarem preventivamente para evitar interferências prejudiciais por falta de sincronização entre as redes.

Assim, o objetivo deste documento é esclarecer quais são os princípios gerais, as premissas e os aspectos de coordenação de sistemas TDD, por meio da padronização de tipos de estrutura de quadros, período, sincronismo, PCIs (do inglês, *Unique Physical-Layer Cell-Identity Groups*), fronteiras internas e externas, níveis de cobertura, distâncias de transição nas fronteiras, entre outros aspectos.

Como princípio básico, é desejável que todas as redes TDD, operando na mesma faixa de frequência e dentro da mesma área, sejam sincronizadas independentemente da tecnologia utilizada 4G (LTE) ou 5G NR.

Ainda, é importante ressaltar que, à medida que as redes evoluam e outras opções sejam viáveis, há liberdade de que as operadoras revejam a estratégia adotada conjuntamente, sempre pela ótica de minimizar interferências prejudiciais e impactos operacionais em suas redes sem, contudo, limitar esta dinâmica de evolução das redes.

2. Premissas Teóricas

Segundo as referências técnicas¹ sobre o assunto, sistemas TDD necessitam de sincronização entre si, para garantir que redes adjacentes enviem e recebam dados de dispositivos móveis ou fixos ao mesmo tempo, e que seja possível operar em um ambiente livre de interferências, sejam elas intrassistêmicas (mesma operadora) ou intersistêmicas (entre diversas operadoras na mesma área de coordenação).

De acordo com a referência técnica, foram adotadas algumas premissas teóricas para elaboração do presente documento, quais sejam:

- As redes devem, preferencialmente, operar de forma síncrona dentro do território nacional, adotando-se o mesmo princípio para as fronteiras internacionais;
- Em uma rede 4G/5G TDD, a sincronização comum e a adoção da mesma estrutura de quadros são aspectos importantes para o bom desempenho da rede; e
- A operação assíncrona, em uma mesma área geográfica, leva a uma situação de alta probabilidade de interferências prejudiciais, se não for utilizada faixa de guarda ou se for usada faixa de guarda insuficiente, para o caso de operação em canal adjacente. No caso de operação assíncrona no modo cocanal, faz-se necessária uma distância de coordenação da ordem de dezenas de quilômetros.^{2,3,4}

Tais premissas de sincronização entre operadores dentro de um país são extremamente necessárias, principalmente para se evitar interferências e garantir uma utilização eficiente do espectro, isto é, sem uma faixa de guarda adicional e sem filtros mais seletivos nos transmissores. Essas também foram premissas adotadas, por exemplo, pela Austrália, China, União Europeia⁵, Japão e Coreia do Sul.

Deste modo, subsídios sobre as premissas para a sincronização entre sistemas TDD e sobre a necessidade de alguma consideração técnica adicional a respeito da sincronização foram solicitados à sociedade, por meio da Consulta Pública nº 60/2020. As contribuições recebidas foram consideradas para elaboração do presente documento.

Por fim, cabe esclarecer que os parâmetros utilizados nesta cartilha são aqueles do LTE-Advanced TDD e do 5G NR TDD e que não foram consideradas outras interfaces de rádio IMT.

1 Relatório: 5G TDD Synchronisation, GSMA, abril 2020. Disponível em: <https://www.gsma.com/spectrum/resources/3-5-ghz-5g-tdd-synchronisation/>

2 Se a sincronização não for implementada, estudos mostram que as distâncias mínimas necessárias entre redes macrocelulares não sincronizadas podem chegar a 60 km quando operando em modo cocanal e até 14 km ao operar no modo canal adjacente, sem utilização de faixa de guarda. Fonte: Relatório ECC 296, março 2019.

3 Sob premissas específicas, para o modo de canal adjacente, a operação assíncrona é possível mediante a instalação cuidadosa de estações rádio base indoor. A instalação cuidadosa inclui medidas como instalação no teto, colocação de estações rádio base afastadas de janelas e blindagem adicional ao redor de edifícios, no pior caso. Fonte: Relatório ECC 296, março 2019.

4 Aplicações *Indoor Small Cells* poderão ser isentas de sincronização desde que nenhuma interferência prejudicial ocorra aos outros sistemas autorizados. Caso duas ou mais redes *indoor* ocupem o mesmo espaço de coordenação poderá ser mandatório o uso de sincronização das redes, dentre outras medidas, em caso de interferências.

5 Relatório ECC Report 296, março 2019.

3. Elementos da Sincronização a serem considerados

A literatura técnica aponta que a sincronização compreende três elementos:

- I. sincronização de relógio;
- II. sincronização de *time slot*; e
- III. sincronização de estrutura de quadro.

Em relação à **sincronização de relógio**, até o momento, os procedimentos mais adotados para entrega de um sinal de referência de tempo têm seguido duas opções metodológicas (e uma combinada ou a combinação de ambos) para os operadores de redes móveis:

- Esquema de sincronização distribuída, com base em satélite GNSS⁶ (GPS ou outros sistemas de geolocalização). Este esquema é utilizado no Japão;
- Esquema de sincronização centralizada, com base no sistema IEEE 1588V2. Este esquema é adotado na Europa; e,
- Esquema de sincronização combinado, usando os métodos anteriores para melhorar a confiabilidade. Tal solução foi adotada na China.

Há diferentes métodos⁷ para se obter a sincronização de relógio, como a partir de redes LORAN (do inglês, *LOng RAnge Navigation*), OTA (do inglês, *Over The Air*), diversas soluções com diferentes perfis ITU-T (G.8275-2, G.8273.4, etc.).

Ainda com base na referência técnica⁸, os meios de fornecer a referência de tempo para as estações base também variam de acordo com as circunstâncias locais, e não há recomendação sobre a melhor maneira de conseguir isso. Uma vez selecionada, a fonte de tempo deve ser monitorada e uma solução de *backup* para continuidade operacional, em caso de perda de sinal de tempo, deve ser definida.

Nesse sentido, é importante que as operadoras optem pela arquitetura de transporte (ou combinação de arquiteturas) mais conveniente para si, sendo respeitadas as condições de adoção de mesma referência de relógio, e manutenção do budget *End-To-End* (já considerando +/- 400 ns de erro na interface área) de *Absolute Time Error* máximo para redes TDD, que é de +/- 1,5 μ s, realizando sincronismo de tempo.

Em relação ao elemento de **sincronização de *time slot***, para um resultado bem-sucedido os parâmetros a seguir precisam ser acordados em uma estrutura de quadros comum, conforme definições do 3GPP:

- Seleção de uma referência de tempo (início do *frame*);
- Seleção de um formato de *frame* – configuração DL/UL;
- Seleção de espaçamento de subportadora (SCS – *Subcarrier Spacing*);

⁶ *Global Navigation Satellite System*.

⁷ Conexis, Carta CT SINDI 184_CP 60/2020 (SEI nº 5912988).

⁸ <https://www.gsma.com/spectrum/resources/3-5-ghz-5g-tdd-synchronisation/>

- Seleção de prefixo normal ou estendido;
- Seleção de uma configuração de *special slot*.

A literatura técnica especializada⁹ apresenta as configurações típicas de estrutura de quadros 5G, detalhando os *slots* de *downlink*, de *uplink* e os *slots* especiais, a partir de exemplos de configurações possíveis (algumas das possibilidades dentre o conjunto de configurações estabelecidas pelo 3GPP), conforme a Tabela 1, em anexo.

Verifica-se que o *slot* especial inclui um período de guarda (do inglês, *Guard Period* - GP) para alternar entre o *downlink* e o *uplink*. O *slot* especial geralmente deve ser configurado com símbolos para o *downlink* e *uplink*, dedicando alguns poucos símbolos para o GP.

As configurações de quadro especificadas na Tabela 1, são apenas exemplificativas, uma vez que não se espera, nesse momento, que todos os fabricantes disponibilizem equipamentos com todas as configurações listadas.

A respeito da sincronização de estrutura de quadro, para sistemas operando em frequências intermediária, de 1 GHz a 6 GHz, propõe-se adotar o entendimento de que:

- I. O espaçamento de subportadoras de 15 kHz, com duração de quadro de 5 ms foi projetado para coexistência com sistemas TD-LTE;
- II. Existem opções diferentes para 30 kHz, em função dos tamanhos de quadro de 2 ms, 2,5 ms ou 5 ms, para os casos em que não haja a necessidade de coexistência com TD-LTE¹⁰ (faixa de frequência mid-band).

Para todos estes casos, observa-se existência de alocação assimétrica entre o *downlink* e o *uplink*.

A partir da definição de que o sincronismo da estrutura de quadros entre redes TDD distintas é a solução ideal, é preciso considerar (i) as possíveis tecnologias (LTE e 5G NR) em face das disponibilidades tecnológicas mais adequadas para o momento atual em cada uma delas, e (ii) as faixas de frequência dessas redes TDD, para se chegar à solução de sincronismo mais adequada às estratégias das operadoras, reduzindo impactos nos modelos de negócio próprios e sem limitar a dinâmica de evolução das redes.

Entende-se ainda que, além da sincronização para convívio entre sistemas TDD, pode ser necessária, principalmente em regiões de fronteiras¹¹ nacionais/internacionais, a definição de condições de coordenação, para limitar a interferência cocanal ou de canal adjacente devido a sobreposição de cobertura entre estações rádio base.

9 5G Technology: 3GPP new Radio, John Wiley & Sons Ltd – 2020, editado por Harri Holma (Nokia Networks, Finlândia), Antti Toskala (Nokia Networks, Finlândia) e Takehiro Nakamura (5G Laboratories, NTT DOCOMO, Inc., Japão).

10 Ou seja, não há sistemas LTE-TDD, na mesma faixa de frequência, pré-existentes, ou já implantados na rede.

11 Relatório: 3300 4200 MHz: A KEY FREQUENCY BAND FOR 5G, GSA, 2020. Disponível em: <https://gsacom.com/paper/3300-4200-mhz-a-key-frequency-band-for-5g/>

As tabelas 2 e 3, em anexo, ilustram os níveis de emissão propostos para operações de sistemas TDD em fronteiras na Europa, no modo sincronizado e não sincronizado.

Adicionalmente, para a implementação mais eficiente dos sistemas TDD, sugere-se que seja avaliada a situação de convivência em regiões de fronteiras nacionais/internacionais, permitindo a coordenação de redes TDD nacionais e estrangeiras por meio de procedimentos contidos nos acordos e atos internacionais subscritos pelo Brasil, para eventual estabelecimento de subconjuntos de PCIs.

O mapa (Figura 1) e a tabela 4, em anexo, derivados da Recomendação ECC (15)01¹², visam exemplificar a subdivisão de seis subconjuntos de PCIs entre fronteiras de países europeus para o caso de utilização de sistemas operando na faixa de 3400 MHz a 3800 MHz.

Considerando o exposto nesta seção, destacam-se os seguintes princípios para a convivência harmoniosa entre sistemas TDD, a serem observados pelas prestadoras:

- Os sistemas TDD no território nacional devem ser sincronizados com base em uma mesma referência de relógio UTC (do inglês, *Coordinated Universal Time*);
- Sincronização¹³ de frequência, fase e tempo, respeitando um valor fim a fim de sincronização de tempo absoluto de no máximo +/- 1,5 µs;
- Adoção de uma mesma estrutura de quadro¹⁴;
- Operadoras nacionais disponibilizam o sincronismo para as vencedoras do bloco regional;
- Preferencialmente, operadoras regionais se sincronizam com os mesmos parâmetros acordados a nível nacional;
- Situações de dissenso entre operações nacionais e regionais para sincronização e adoção de esquemas UL/DL comuns podem representar estratégias específicas¹⁵ para captura de diferentes oportunidades. Como parte do processo, as partes envolvidas devem realizar a coordenação para garantir que não ocorra interferência prejudicial entre as redes.

Adicionalmente, outras medidas para garantir a convivência entre as redes também podem ser adotadas:

- Blindagem de antena;
- Desapontamento das antenas em relação à fronteira (incluindo *tilting*);
- Uso de antenas direcionais inteligentes;
- Redução/limitação da altura da antena;

¹² Recomendação ECC (15)01. Disponível em: <https://www.ecodocdb.dk/download/08065be5-1c0b/REC1501.PDF>

¹³ O princípio básico para os sistemas TDD é a operação com sincronização, porém há exceções. Aplicações *Indoor Small Cells* poderão ser isentas de sincronização desde que nenhuma interferência prejudicial ocorra aos outros sistemas autorizados. Outra possível exceção seria a operação com adoção de faixa de guarda, a fim de evitar a interferência prejudicial.

¹⁴ Compreende o mesmo padrão de distribuição de símbolos OFDM de *downlink* e *uplink*, o mesmo formato de *slot special "S"* e o mesmo espaçamento de subportadoras (SCS, do inglês *Subcarrier Spacing*).

¹⁵ Eventualmente, situações de regiões remotas, atendimentos específicos industriais com baixa ou nenhuma incidência de interferência podem demandar outra estrutura de quadro UL/DL

- Redução da potência do transmissor;
- Implantação de redes heterogêneas perto da fronteira (ou seja, implantação de micro e pico *base stations*);
- Adoção, caso necessária, de faixa de guarda;
- Separação geográfica entre as redes (definição de *buffer zone*).

Ademais, são listados abaixo os padrões internacionais considerados basilares para a determinação das características técnicas de sincronização dos sistemas 4G/5G:

- *ITU-T G.811: Timing characteristics of primary reference clocks.*
- *ITU-T G.8271.1: Network limits for time synchronization in packet networks with full timing support from the network.*
- *ITU-T G.8271.2: Network limits for time synchronization in packet networks with partial timing support from the network*
- *ITU-T G.8275.1: Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network*
- *ITU-T G.8275.2: Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with partial timing support from the network*
- *3GPP TS 38.104 V16.3.0 (2020-03): Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 16).*

4. Possíveis etapas para a solução de coordenação

Caso necessário, a Agência estabelecerá condições de convivência de sistemas TDD e poderá adotar um procedimento para a solução de eventuais problemas de sincronização, conforme apresentado a seguir.

Passos basilares de coordenação:

1. Mediação entre as operadoras para que busquem uma solução em comum acordo;
2. Caso não ocorra acordo, propõe-se os seguintes passos a serem considerados:
 - a. Se a maioria das operadoras nacionais acordar configuração comum de sincronismo, a minoria que não estiver de acordo, ou operadoras regionais¹⁶, deverá adotar faixa de guarda ou *buffer zone*, para poder usar outra configuração;
 - b. Caso não haja uma maioria determinada e não haja concordância da minoria em adotar sincronismo único, a Anatel poderá, entre outras alternativas, adotar os seguintes quadros¹⁷:

Caso 4G^{18,19}:

Faixa de Frequência TDD	SCS	Formato <i>frame pattern</i>	Configuração DL/UL	Prefixo cíclico	Formato DL-GP-UL	Latência na interface aérea
2,3 GHz*	15 kHz	DDDDDDDSUU	8:2	Normal	8-2-4	5 ms
2,5 GHz*	15 kHz	DDDDDDDSUU	8:2	Normal	8-2-4	5 ms

* No caso de utilização dessas faixas por sistemas 5G, será avaliado o formato de quadro mais adequado.

Caso 5G:

Faixa de Frequência TDD	SCS	Formato <i>frame pattern</i>	Configuração DL/UL	Prefixo cíclico	Formato DL-GP-UL	Latência na interface aérea
3,5 GHz	30 kHz	DDDSU	4:1	Normal	10-2-2	2.5 ms
26 GHz	120 kHz	DDDSU	4:1	Normal	10-2-2	0,625 ms


- c. Em uma fronteira internacional, caso não seja possível para as operadoras nacionais estabelecer de comum acordo com as operadoras de outro país um formato de quadro e/ou a adoção de um sincronismo único, a Anatel deverá ser comunicada, para que possa, junto ao regulador do país limítrofe, estabelecer as bases de coexistência dos sistemas TDD.

16 Parte-se do pressuposto que as operadoras nacionais disponibilizam o sincronismo para as vencedoras do bloco regional. Por conseguinte, as operadoras regionais operam com os mesmos parâmetros de sincronismo das operadoras nacionais.

17 Os valores *default* apresentados são indicativos de quais parâmetros a agência poderá adotar em caso de necessidade de atuação. O valor *default* de estrutura de quadro especificado aqui poderá ser atualizado pela agência para refletir evoluções das condições técnicas e econômicas quando o 5G chegar à maturidade de mercado. Destaca-se que a Agência espera, a priori, a autorregulação conjunta dos diversos operadores em relação à escolha da estrutura de quadro a ser adotada. Entretanto, cabe ressaltar que a agência não se eximirá de agir caso necessário.

18 Nesse Relatório, a configuração de quadro "DDDDDDDSUU" é usada para representar a performance que sistemas 5G-NR teriam no caso de operação sincronizada com um sistema LTE-TDD na mesma faixa de frequências e na mesma área de coordenação, usando a configuração de quadro LTE-TDD #2. Fonte: Relatório ECC 296, março 2019.

19 Especificação técnica 36.211 do 3GPP (TS 36.211).

- 
3. Espera-se que os operadores/fabricantes apresentem um plano de divisão de PCIs para fronteiras nacionais e para fronteiras internacionais, que balizará o estabelecimento de acordos com os países fronteiriços ou nas fronteiras internas do país. Caso haja problemas de interferência prejudicial decorrentes do desalinhamento de PCIs, a Agência poderá adotar um esquema de sincronização utilizado em outros países, como por exemplo, HCM *agreement*²⁰, ECC *Recommendation* (15)01²¹ e fará uma subdivisão dos grupos de PCIs por fronteira;
 4. Para limitar problemas de sobrealcance e interferências, mesmo em casos de redes sincronizadas, a Agência poderá limitar a altura máxima da antena considerando a altura média do terreno, principalmente nas proximidades de fronteiras internas/externas ($\leq 1,5$ km para sistemas FR1, e $\leq 1,1$ km para sistemas FR2 com 120 kHz de SCS). Espera-se que os operadores/fabricantes apresentem uma sugestão de valor ou de proposta de controle; e,
 5. Além da adoção dos passos acima descritos, a imposição de limitação de potência, *tilting*, ou quaisquer outros métodos de mitigação de interferência poderão ser utilizados.

20 Acordo para sincronização. Disponível em: <http://www.hcm-agreement.eu/>

21 Recomendação ECC (15)01. Disponível em: <https://www.ecodocdb.dk/download/08065be5-1c0b/REC1501.PDF>

Anexos

Tabela 1 - Opções típicas de configuração de quadro TDD (D = slot de downlink, S = slot especial, U = slot de uplink, SCS = subcarrier spacing, Frame = quadro TDD em ms).

SCS	Frame	1 ms		1 ms		1 ms		1 ms		1 ms	
15 kHz	5,0 ms	D		D		D		S		U	
30 kHz	5,0 ms	D	D	D	D	D	D	D	S	U	U
30 kHz	2,5 ms	D	D	D	S	U	D	D	S	U	U
30 kHz	2,5 ms	D	D	D	S	U					
30 kHz	2,0 ms	D	D	S	U						
120 kHz	0,625 ms	D	D	S	U						
120 kHz	0,5 ms	D	D	S	U	D	D	S	U	D	D
		S	U	D	D	S	U	D	D	S	U
		D	D	S	U	D	D	S	U	D	D
		S	U	D	D	S	U	D	D	S	U
		D	D	S	U	D	D	S	U	D	D
		S	U	D	D	S	U	D	D	S	U
		D	D	S	U	D	D	S	U	D	D
		S	U	D	D	S	U	D	D	S	U

Fonte: 5G Technology: 3GPP new Radio, John Wiley & Sons Ltd – 2020, editado por Harri Holma (Nokia Networks, Finlândia), Antti Toskala (Nokia Networks, Finlândia) e Takehiro Nakamura (5G Laboratories, NTT DOCOMO, Inc., Japão).

Tabela 2 - Níveis de emissão em regiões de fronteiras modo sincronizado.

Caso Sincronizado		
Frequência central alinhada		Frequência central não alinhada
PCI preferencial	PCI não preferencial	Todos os PCIs
67 dBμV/m/5MHz @ 0 km ^e 49 dBμV/m/5MHz @ 6 km	49 dBμV/m/5MHz @ 0 km	67 dBμV/m/5MHz @ 0 km ^e 49 dBμV/m/5MHz @ 6 km

Fonte: Recomendação ECC (15)01

Tabela 3 - Níveis de emissão em regiões de fronteiras modo não-sincronizado²².

Caso Não Sincronizado		
Bloco de frequência preferencial		Bloco de frequência não preferencial
PCI preferencial	PCI não preferencial	Todos os PCIs
45 dBμV/m/5MHz @ 0 km ^e 27 dBμV/m/5MHz @ 6 km	27 dBμV/m/5MHz @ 0 km	0 dBμV/m/5MHz @ 0 km

Fonte: Recomendação ECC (15)01

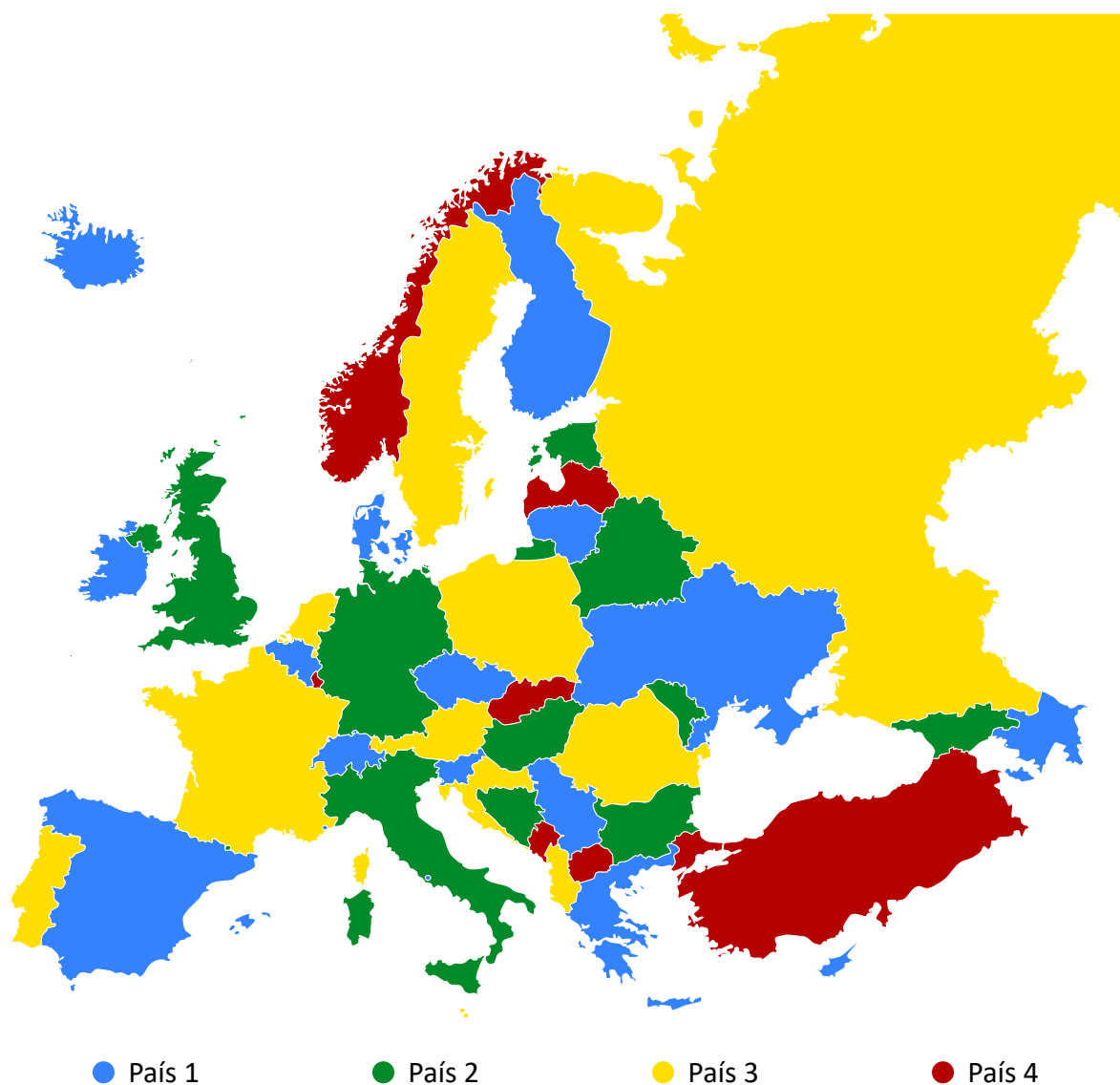
Tabela 4 - Subconjuntos de PCIs nas fronteiras.

PCI	Configuração A	Configuração B	Configuração C	Configuração D	Configuração E	Configuração F
País 1	0..83	84..167	168..251	252..335	336..419	420..503
Fronteira 1-2						
Zona 1-2-3						
Fronteira 1-3						
Zona 1-2-4						
Fronteira 1-4						
Zona 1-3-4						

Fonte: Recomendação ECC (15)01

22 A não sincronização ao longo das fronteiras impactaria drasticamente as implantações.

Figura 1 - Subdivisão de PCIs por fronteiras.



Fonte: Recomendação ECC (15)01

- **País tipo 1:** Azerbaijão, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslovênia, Espanha, Finlândia, Grécia, Irlanda, Islândia, Lituânia, Mônaco, República Checa, San Marino, Sérvia, Suíça, Ucrânia e Vaticano.
- **País tipo 2:** Alemanha, Andorra, Belarus, Bósnia e Herzegovina, Bulgária, Estônia, Reino Unido, Geórgia, Hungria, Itália, Moldova e Rússia (Exclave).
- **País tipo 3:** Albânia, Áustria, França, Croácia, Malta, Países Baixos, Polônia, Portugal, Romênia, Rússia e Suécia.
- **País tipo 4:** Eslováquia, Letônia, Liechtenstein, Luxemburgo, Macedônia, Montenegro, Noruega e Turquia.

