

ACOPLAMENTO VIRTUAL ATRAVÉS DE MONITORIZAÇÃO FERROVIÁRIA DEFINIDA POR SOFTWARE

João T. Fernandes¹, Marília Curado¹, Fernando Boavida¹ e Rui Calçada²

¹ Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Informática, Centro de Informática e Sistemas, Pólo II, Pinhal de Marrocos, 3030-290, Coimbra, Portugal

email: joaonf@dei.uc.pt <https://www.uc.pt/fctuc/dei/>

² Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Rua Doutor Roberto Frias, 4200-465, Porto

Sumário

A ferrovia está a ganhar importância, levando a uma maior necessidade de monitorização do sistema ferroviário. Para isso, trabalhos nas áreas de instrumentação e comunicações abriram portas para uma maior promoção de manutenções preditivas. Neste contexto, o artigo apresenta resultados, através de um exemplo de Acoplamento Virtual, onde se variou a largura de banda e a topologia de envio nos comboios. Os resultados obtidos mostram que dotar cada veículo de comunicação autónoma é vantajoso, mas tem o inconveniente de tornar mais difícil obter uma visão global do comboio. O artigo apresenta uma variante da SDN, intitulada Software-Defined Railway Monitorization (SDRM).

Palavras-chave: Software-Defined Railway Monitorization, Protocolo para Gestão Ferroviária, Manutenção Ferroviária Inteligente, Acoplamento Virtual.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias que correm, a ferrovia ganha cada vez mais importância dada a facilidade no transporte quer de passageiros, quer de mercadorias. Um dos grandes fatores mobilizadores para este meio de transporte é o custo e a facilidade de acesso que não se vê, por exemplo, no transporte aéreo. Nesse sentido, tem-se vindo a verificar um crescente aumento no investimento na ferrovia, levando à criação de novas infraestruturas e compra de veículos. Apesar da pandemia ter tido um grande impacto no transporte ferroviário onde, nalguns casos, ultrapassou os 50% de quebra, conforme se pode ver no Quadro 1, proveniente de [1], está prevista uma recuperação rápida dadas as políticas implementadas pela União Europeia, que favorecem as viagens de comboio, e a canalização de fundos para uma melhoria do sistema ferroviário em toda a Europa, levando-o a ser cada vez mais unido, homogéneo e fácil para qualquer pessoa o usar.

Quadro 1. Evolução do transporte de passageiros por cada quilómetro ferroviário (em milhões) desde 2013, em vários países da Zona Euro. Nos campos assinalados a “-” significa que não há dados.

País	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Alemanha	89 615.0	90 976.0	91 603.0	94 197.0	95 530.0	98 170.0	102 028.0	-
Áustria	11 915.0	12 092.0	12 208.0	12 578.0	12 656.7	13 204.7	13 350.0	7 417.0
Bélgica	10 595.0	10 974.0	10 333.0	10 025.0	10 167.0	-	-	-
Eslováquia	2 485.0	2 583.0	3 411.0	3 595.0	3 873.0	3 915.0	4 093.0	2 180.0
Espanha	23 788.0	25 072.0	26 142.0	26 670.0	27 487.0	28 434.0	28 835.0	-
Finlândia	4 053.0	3 874.0	4 113.0	3 868.0	4 271.0	4 534.0	4 924.0	2 820.0

França	105 215.0	104 589.0	104 849.0	104 207.0	110 568.0	107 935.0	112 478.0	64 889.0
Grécia	755	1 072.0	1 263.0	1 192.0	1 109.0	1 104.0	1 252.0	640
Irlanda	1 592.0	1 863.0	1 917.0	1 990.0	2 121.0	2 281.0	2 399.0	-
Itália	48 739.0	49 957.0	52 207.0	52 178.0	53 231.0	55 493.0	56 586.0	22 398.0
Luxemburgo	394	409	418	418	438	442	463	269
Países Baixos	17 700.0	16 200.0	15 800.0	16 900.0	17 800.0	22 600.0	19 400.0	9 200.0
Portugal	3 649.0	3 852.0	3 957.0	4 146.0	4 391.0	4 487.0	4 964.0	2 552.0

A par do crescimento ferroviário, a tecnologia também tem vindo a acelerar de forma rápida, o que faz com que tecnologias atualmente em uso estejam cada vez mais obsoletas e com uma urgência cada vez maior em trocar. Um desses exemplos é o Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R), que usa, como base, a segunda geração (2G) de comunicações, datado do ano de 2000. Apesar do sistema continuar a ser amplamente usado em todo o mundo, dado ser bastante robusto e ter sido implementado já numa vertente ferroviária, novas gerações (4G e 5G) já estão em estudo e implementação para substituir esta nova tecnologia. Um dos grandes objetivos é melhorar a manutenção, que poderá vir através da redução de custos, tempo de paragem, otimização das ações de manutenção, entre outros. Para isso acontecer, são necessários cada vez mais dados provenientes dos próprios veículos e da infraestrutura, levando a que cada vez mais sistemas externos (i.e., equipamentos de comunicação e medição) sejam integrados na ferrovia – não considerando o. Por sua vez, mais dados são gerados e enviados para servidores ou outros dispositivos para visualização e processamento da informação recolhida. Sendo o GSM-R uma tecnologia antiga, não tem capacidade para acompanhar estas evoluções, pelo que as novas gerações de telecomunicações vêm introduzir essa camada extra que pode permitir, no fim, melhorar a manutenção e até torná-la cada vez mais preditiva.

Conforme já referido, estão previstos investimentos em todo o setor ferroviário, desde a infraestrutura aos comboios. Ao mesmo tempo, com a introdução da nova tecnologia de comunicação na ferrovia, no futuro poderemos vir a ter cada vez a uma manutenção preditiva, otimizando assim os tempos de paragem, reduzindo custos associados à manutenção, entre outros. No entanto, esta ligação dos dados até à manutenção não é homogénea e, com cada vez mais dados disponíveis, torna-se necessário também harmonizar e homogeneizar estas ligações. Nesse sentido, o presente artigo apresenta uma variante do *Software-Defined Networking* (SDN) mais focada na ferrovia, intitulada *Software-Defined Railway Monitorization* (SDRm).

Um exemplo para abordar esta nova variante será através do Acoplamento Virtual, onde para além de existir uma ligação física dos próprios comboios, passa a ser também importante que exista uma ligação virtual e que os vários dados recolhidos sejam processados de forma igual, ou seja, etiquetar e enviar os dados de acordo com as necessidades. Nesse sentido, o capítulo 2 apresenta com mais detalhe paradigmas atuais na ferrovia a nível de recolha de dados bem como no SDN. O capítulo 3 apresenta e descreve a nova proposta de solução. O capítulo 4 descreve o cenário que envolve os testes, quer a nível da arquitetura quer a nível da transmissão de dados. O capítulo 5 apresenta os resultados de acordo com a variação de alguns dos parâmetros do sistema.

2 PARADIGMAS E DESAFIOS ATUAIS

A ferrovia está a viver uma evolução abrupta, com cada vez mais tecnologias a serem introduzidas no mercado. Desde sistemas autónomos para controlo do comboio de forma independente ou à distância, como os apresentados em [2] ou [3], até a vários sistemas de deteção de defeitos, com recursos diferentes tipos de sensores e métodos, como os apresentados em [4], [5] e [6], todos passam pelo mesmo problema: escalabilidade do sistema ferroviário. O crescimento evidente leva a uma heterogeneidade de informação, o que causa uma maior dificuldade em introduzir novos sistemas ou técnicas na ferrovia. Ao mesmo tempo, a disponibilidade da rede 5G permite cada vez mais a inclusão de mais e melhores equipamentos de medição, para permitir não só uma melhor manutenção (seja baseada em condição ou preditiva) como também sistemas como o acoplamento virtual ou condução autónoma. Trabalhos como o desenvolvido em [7] são importantes para demonstrar a potencialidade do 5G, bem como as vantagens da maior taxa de envio de dados, robustez, alta fiabilidade e baixas latências das redes sem fios

permitem trazer para ambientes ferroviários. No entanto, há um paradigma aplicado à área das redes que tem vindo a ser cada vez mais usado, dado dinamismo, eficiência nas configurações, entre outras vantagens, que é o Software-Defined Networking (SDN). Conforme se pode ver em [8], esta tecnologia introduz o conceito de “controladores” que é onde a inteligência da rede está incorporada, permitindo uma arquitetura centralizada com separação em camadas: (1) camada de dados, composta por elementos e agentes da rede, (2) camada de controlo, que é onde os controladores centralizam a informação proveniente das restantes camadas e aplicam a inteligência, e (3) camada de aplicações, onde estão as aplicações que comunicam com a rede. A comunicação entre a camada (1) e camada (2) funciona com base em OpenFlow, que define padrões e que tipo de protocolos devem ser seguidos em cada um dos elementos da rede. Quando comparado com a ferrovia, este tipo de arquitetura e protocolo de gestão de rede aparentam fazer todo o sentido, permitindo facilitar a troca de informações entre vários equipamentos. Na próxima secção, e tendo em conta o mencionado acima, pretende apresentar uma proposta de solução de SDN e OpenFlow aplicado para a ferrovia.

3 PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A utilização de SDN na ferrovia pode vir a trazer benefícios significativos dado permitir combater o problema da heterogeneidade e escalabilidade de dados. Com a novas gerações de rede (e.g., 5G) e maior facilidade em trocar informação entre sistemas, torna-se crucial controlar e gerir todos os sistemas. Assim, o presente artigo apresenta uma variante do SDN aplicada à ferrovia: Monitorização Ferroviária Definida por Software (SDRm, do inglês *Software-Defined for Railway Monitorization*). Ao manter todas as características do paradigma inicial, como o caso dos três planos, permite integrar um controlador central que passa a gerir e atuar sobre todos os restantes sistemas, seja na camada de dados como na camada de aplicação, conforme mostra a **Figura 1**.

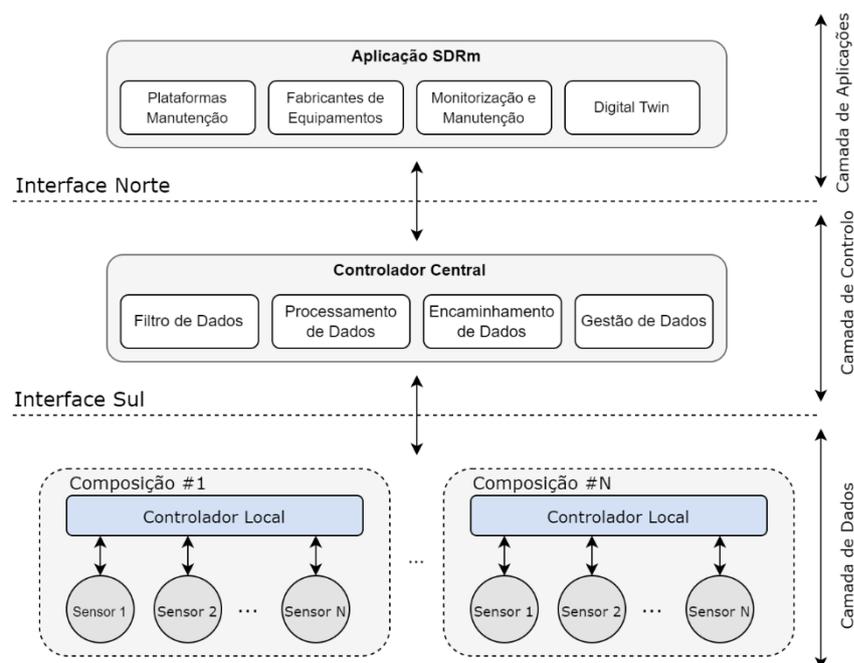


Figura 1. Nova variante do SDN aplicada à ferrovia: Monitorização Ferroviária Definida por Software (SDRm).

Tal como mencionado na Secção 2, o SDN também tem associado um protocolo para apoio à gestão dos diversos componentes de rede, que é o OpenFlow. No caso do SDRm, será introduzido um novo Protocolo para Gestão Ferroviária, o RAMP (do inglês *Railway Management Protocol*). O objetivo principal é atuar sobre a Interface Sul

da arquitetura e proporcionar, tanto ao Controlador Central como às diversas composições ferroviárias, uma forma simples de trocar pedidos e mensagens, no sentido de gerir problemas ou atuar de acordo com determinadas situações. Este protocolo de gestão tem, como base, a utilização do protocolo de mensagens *Message Queueing Telemetry Transport* (MQTT), que, por si só, suporta diversos mecanismos de comunicação e segurança, e também um sistema de mensagens de subscrição, que facilita não só a troca de mensagens, mas também o próprio controlo do sistema no geral.

A especificação do RAMP ainda está numa fase de estudo e validação, mas para obedecer aos padrões que o protocolo exige, são determinadas uma série de *chaves* que os sistemas nas camadas de dados devem seguir que, depois, são interpretadas pelos controladores na camada de controlo. Estas chaves são usadas para calcular tempos, executar ações e gerir as ligações. O trabalho feito até agora passa por uma versão mínima do que se pretende executar no futuro, mas os testes feitos já implicam a utilização de mensagens de estado (i.e., *heartbeats*) e *chaves* de controlo (i.e., no envio dos dados há mensagens que o controlador lê e atua de acordo com elas).

4 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO DE ENSAIOS

Com o intuito de testar as comunicações entre o comboio e um controlador central, de acordo com o SDRm e o protocolo para gestão RAMP, foi utilizado o software COREEMU, que permite simular e virtualizar redes e ligações entre equipamentos. Para tal, o sistema usado consistia numa máquina virtual a correr Ubuntu 20.04, com 8 cores e 4Gb de RAM. Nesse sentido, e conforme a **Figura 2**, foi simulado o acoplamento virtual de um comboio composto por uma locomotiva e três vagões, ligados a um controlador central.

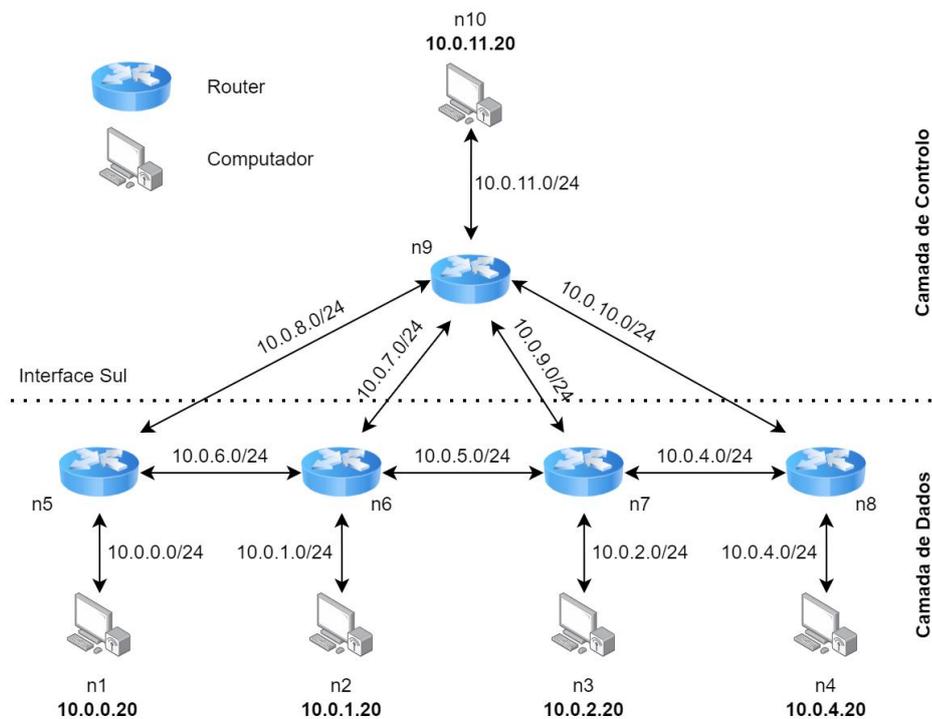


Figura 2. Arquitetura usada para simular a ligação o acoplamento virtual entre uma locomotiva e vagões, com comunicação com o servidor principal.

Apesar de ser feita uma divisão entre vagões (n2, n3 e n4), locomotivas (n1) e controlador central (n10), a sua representação, no sentido mais abstrato, é igual. Em todos é considerado que têm um computador com capacidades

de processamento, comunicação e envio de dados. Ao mesmo tempo, e conforme se pode verificar na **Figura 2**, todos os routers (n5, n6, n7, n8 e n9) conseguem comunicar entre si e com os computadores por diversos caminhos. Por outras palavras, se existir uma falha no router n6, a comunicação no computador n1 para o n3 poderá ser desviada pelo router n9.

Esta abstração e a redundância de ligações permitem abstrair do tipo de composição (i.e., passageiros ou mercadorias) e concentrar os trabalhos na comunicação de cada um dos elementos do comboio (n1, n2, n3 e n4) com o computador central (n5), conforme o conceito primário do paradigma SDN assim o define. O objetivo principal do uso deste paradigma na ferrovia é a otimização da comunicação entre os vários elementos que a compõem, como os vagões, carruagens, ou locomotivas, com o controlador central onde os dados são tratados e processados. Com uma necessidade cada vez maior de ter comboios instrumentados, torna-se também imprescindível ter a certeza de que os dados são transmitidos corretamente. Na arquitetura proposta no início da Secção 4, objetivo é não só ter os dados recolhidos nos vagões e locomotiva a serem transmitidos para o controlador central como também ter o controlador central a supervisionar os estados de cada comboio. Um dos pontos importantes é também a otimização dos próprios sistemas do comboio, ou seja, evitar o gasto desnecessário de energia e de componentes para manter em funcionamento o mínimo para recolha e transmissão de dados. Isto implica estudar taxas e frequência de transmissão, tipos de protocolo de comunicação a usar, geração de energia embarcado, entre outros. Com isto, é então importante perceber de que forma é que:

- Os comboios se ligam pela primeira vez ao controlador central.
- Os comboios comunicam dados.
- É que o controlador central comunica e atua sobre os comboios ligados à rede.

3.1 Ligação ao Controlador central

Começando pela primeira, considera-se que o controlador central está ligado infinitamente, à espera de receber ligações por parte dos vários elementos ferroviários. Quando chega um pedido de ligação, o sistema analisa as informações que são enviadas (onde tem de vir incluído o número do comboio e posição GPS), coloca na base de dados e verifica se já existe algum sistema ligada cujo número do comboio seja o mesmo. Se existir algum, o sistema vai executar um algoritmo que calcula a distância geodésica entre cada um dos comboios (seja locomotiva ou vagões). A distância geodésica é definida pelas seguintes fórmulas:

$$a = \arccos(p1 * p2) \tag{1}$$

$$d = a * \pi * rT \tag{2}$$

Onde em (1), o $p1$ e $p2$ referem-se às coordenadas geográficas de cada um dos comboios, e em (2) o a é o resultado obtido em (1) e o rT é o raio da terra. Posteriormente, ordena de acordo com a distância obtida através da fórmula (2). Caso no final existam duas composições que sejam espelhadas (e.g., 1, 2 e 3, e 3, 2 e 1), assume-se que a composição final é aquela que considere como *master* a locomotiva. O processo repete-se sempre que um novo comboio se conectar ao controlador central ou houver alguma atualização nos dados de um comboio. Caso não existam composições espelhadas, significam que não há nenhuma composição para ser formada. A **Figura 3** mostra um exemplo da execução desse algoritmo, onde, no início, calcula a distância geodésica para cada um dos comboios face aos outros e depois tenta verificar se existem composições espelhadas. Neste caso, existe uma que é o C1 e o C4.

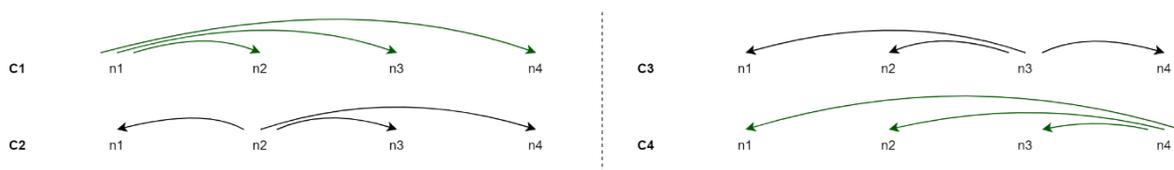


Figura 3. Exemplo do algoritmo descrito onde existem duas composições espelhadas (C1 e C4).

3.2 Comunicação dos Dados

Tendo uma ligação já feita entre cada um dos comboios e o controlador central, bem como a que composição pertencem os comboios, os comboios passam a comunicar de acordo com uma série de *tags* já definidas na Secção 3, ou seja, através do Protocolo para Gestão Ferroviário (RAMP do inglês *Railway Management Protocol*).

Os comboios, apesar de terem sistemas com especificações bem definidas, mas restritas (e.g., Unidade Central de Comando, Unidade de Comando de Tração, Sistema de Controlo de Velocidade), estão sujeitos a instalações de equipamentos de medição externos, podendo estes ser ou não temporários. Um exemplo é a instalação de acelerómetros para medir forças aplicadas às unidades ou extensómetros para medir a dilatação de diversos componentes. Independentemente dos sensores ou equipamentos a instalar, a utilização do RAMP permite abstrair do tipo de dados e focar mais as questões de transmissão e encaminhamento dos dados a nível do controlador central.

A uniformização do sistema com a utilização do RAMP pode vir a ser fundamental para homogeneizar todos os sistemas que possam vir a ser instalados nos comboios. Neste exemplo específico, e partindo da arquitetura apresentada na **Figura 2** e do mencionado na subsecção anterior, os dados poderão ser enviados de duas formas:

1. São reencaminhados até à locomotiva.
2. Enviados diretamente para o controlador central caso a ligação à locomotiva falhe.

Em ambos os casos, o controlador central toma sempre a decisão com base nas informações que estejam a chegar. Ao mesmo tempo, a cada segundo os comboios enviam para o controlador central um *heartbeat* que informa que estão ligados. Com qualquer uma das formas e a par com os *heartbeats*, o controlador central passa a ter toda a informação necessária para depois atuar em concordância com o que está a acontecer.

3.3 Atuação nos Comboios

Nas subsecções anteriores falou-se sobre a ligação ao controlador central e a transmissão entre os comboios e o controlador central. Com a utilização do RAMP, o controlador central passa também a mandar mensagens diretamente para o comboio e indicar de que forma é que devem atuar. Depois de ser definida a composição, todos os canais de comunicação mantêm-se abertos, conforme a **Figura 2** acima ilustrava. No entanto, o controlador central pode sugerir a utilização de um canal específico para poder agregar todos os dados de forma uniforme, de maneira a não só usufruir da largura de banda disponível como também para que os equipamentos instalados nos comboios possam ser menos complexos e eficientes. A **Figura 4** mostra um exemplo onde o caminho no qual os dados devem seguir é até ao n1 (que pode ser a locomotiva) que, posteriormente, reencaminha tudo para o controlador central n10. As ligações dos vários routers (n6, n7 e n8) ao router central (n9) mantêm-se na mesma ligadas para trocas de mensagens *heartbeats*, para indicarem se estão operacionais, e também para poderem atuar caso alguma das ligações assinaladas a azul falhar.

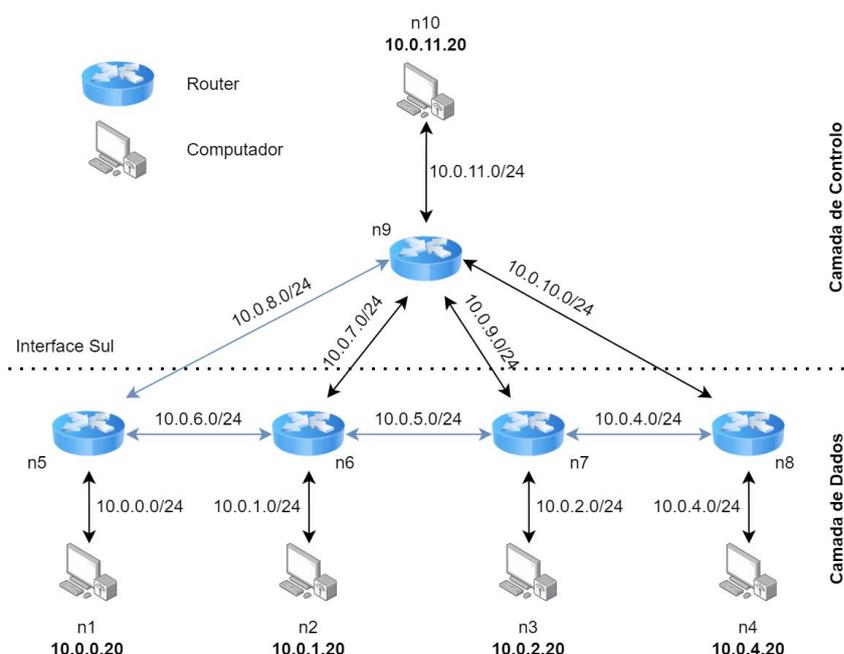


Figura 4. Exemplo de um canal de comunicação que o controlador central (n10) sugeriu - assinalado com as setas a azul.

Nesta secção foram descritos o cenário e o modo de funcionamento do sistema atual, desde a primeira interação entre os comboios e o controlador central, como de que forma é que a integração do protocolo RAMP permite a dinamização da comunicação entre os sensores e o controlador central, sem afetar o tipo de dados a serem recolhidos por cada comboio. Todo o desenvolvimento foi feito em Python, tendo sido feito uso do protocolo MQTT para ligação dos vários nós. O envio de mensagens foi feito de forma assíncrona, tendo sido criadas *threads* específicas quer para os dados a enviar quer para os *heartbeats* que cada comboio enviava para o servidor central.

Na próxima secção são apresentados os resultados preliminares desta solução afetando a transmissão dos dados e desconectando subitamente um dos comboios.

5 ENSAIOS E RESULTADOS

Para testar a solução de Monitorização Ferroviário Definida por Software (SDRm), foram feitos testes com o cenário descrito anteriormente. Os testes efetuados compreendem as características apontadas no Quadro 2. Para cada teste foram feitos 24 ensaios tendo o nó considerado como a locomotiva (n1) sido apenas usado como ponto de encaminhamento de dados e não de recolha. Os dados eram enviados a cada 2 segundos, com um total de 72kB. No caso dos heartbeats a enviar, o tamanho da mensagem para os testes a efetuar é desprezável.

Quadro 2. Testes feitos para avaliação do sistema proposto na subsecção anterior.

Id	Teste	Parâmetros testados	Avaliação
1	Ligação de acordo com o algoritmo de formação de composição (Subsecção 3.1).	Variação da largura de banda (500Kbps, 1Mbps e ilimitado).	Tempo que demora a enviar dos vários comboios para o controlador central.
2	Ligação direta dos vários comboios ao servidor central.	Variação da largura de banda (500Kbps, 1Mbps e ilimitado).	Tempo que demora a enviar dos vários comboios para o controlador central.

- 3¹ Desconexão de um comboio à rede. Variação da largura de banda (500Kbps, 1Mbps e ilimitado). Tempo que demora a enviar dos vários comboios para o controlador central.

Começando pelo teste 1, o Quadro 3 abaixo apresenta os resultados para a ligação conforme o que o algoritmo apresentado na subsecção 3.1 mencionava. Neste teste, as ligações feitas são a representação que está ilustrada na **Figura 4**, ou seja, o caminho dos dados é o assinalado pelas setas azuis.

Quadro 3. Tempo (em milissegundos) que os dados demoram a chegar de um comboio (n2, n3 e n4) até ao controlador central (n10), quando ligados entre eles.

ILIMITADO			1 MBPS			500 KBPS		
n2 para n10	n3 para n10	n4 para n10	n2 para n10	n3 para n10	n4 para n10	n2 para n10	n3 para n10	n4 para n10
10	22	25	509	982	1418	29428	30372	31355
10	20	21	508	994	1430	30356	31293	32278
10	21	27	505	985	1421	31272	32207	33186
10	21	27	504	985	1427	32186	33119	34111
20	24	22	504	983	1424	33113	34048	35029
16	23	20	506	986	1422	34040	34966	35943
10	17	21	511	985	1426	34950	35879	36852
16	29	34	507	982	1428	35857	36792	37773
15	36	30	505	981	1426	36783	37722	38693
10	27	25	500	978	1419	37702	38637	39614
9	24	21	504	981	1417	38618	39559	40525
10	25	24	503	980	1414	39526	40473	41448
10	25	27	500	982	1417	40452	41390	42357
9	24	21	507	989	1430	41358	42298	43266
10	30	33	502	975	1420	42265	43209	44181
10	25	21	506	985	1422	43181	44136	45120
11	20	24	504	984	1417	44117	45062	46039
10	28	27	494	991	1417	45034	45973	46945
10	21	25	507	988	1429	45937	46880	47859
9	22	26	505	979	1425	46862	47810	48784
12	27	26	500	977	1415	47785	48728	49701
10	20	26	504	982	1419	48701	49627	50606
10	24	21	501	980	1418	49615	50549	51532
10	27	28	505	989	1427	50541	51474	52454

Tal como seria de esperar, o envio dos dados do comboio mais afastado da locomotiva é muito superior ao do mais próximo. No caso de uma maior restrição de envio de dados, é possível verificar que começa a existir cada vez mais um atraso no envio das mensagens, tendo demorado, no primeiro envio, cerca de 30 segundos, enquanto no último já ia nos 50 segundos. Isto indica que o canal estava a ficar cada vez mais obstruído dado haver ainda dados a serem enviados. Se se comparar com os resultados do teste 2, presentes no Quadro 4, as conclusões a tirar já são completamente diferentes.

Quadro 4. Tempo (em milissegundos) que os dados demoram a chegar de um comboio (n2, n3 e n4) até ao controlador central (n10), quando ligados diretamente.

ILIMITADO			1MBPS			500KBPS		
n2 para n10	n3 para n10	n4 para n10	n2 para n10	n3 para n10	n4 para n10	n2 para n10	n3 para n10	n4 para n10
5	5	5	485	485	486	974	970	968
5	5	5	486	485	486	968	968	967

¹ Este teste é o resultado dos dois testes anteriores, dado que os tempos já foram medidos.

5	5	5	486	485	486	967	968	974
5	5	5	485	488	485	978	970	968
5	5	5	486	485	486	971	969	971
5	5	5	485	487	485	969	970	974
5	6	5	487	489	488	971	971	975
5	5	5	486	487	486	981	969	967
5	4	5	486	486	485	972	968	972
5	5	5	486	485	489	968	967	968
5	5	5	486	487	489	969	970	976
5	5	6	486	486	489	975	970	970
5	5	5	486	486	485	967	969	971
5	5	5	487	485	487	968	969	975
5	5	5	486	486	487	978	974	968
5	5	5	489	486	486	971	973	970
5	5	5	488	486	485	968	975	968
5	5	6	486	486	485	969	969	976
5	5	5	486	486	486	980	971	968
5	5	5	485	486	485	967	968	969
5	7	5	485	485	485	969	970	970
5	5	5	487	486	486	970	971	973
5	5	5	486	485	486	968	969	969
5	5	5	485	487	486	966	972	970

Neste caso, como a ligação é feita diretamente do comboio para o controlador central, o tempo de envio é muito inferior e não existe praticamente nenhuma obstrução do canal de comunicação. Comparando inicialmente o caso onde a largura de banda é ilimitada, e tendo em conta que atualmente se pretende alcançar mais o tempo útil que o tempo real, a diferença de 5ms para 25ms (± 3 ms) poderá ser considerada insignificante. No entanto, para o caso de uma restrição no canal de comunicação e apenas estar disponível uma largura de banda de 500Kbps, o mesmo já não pode ser dito. Dado que todos os dados, no caso do teste 1, são enviados através do router n5, a quantidade de dados a chegar a cada 2 segundos é superior à capacidade do canal, os dados começam a ser enviados com cada vez mais atraso. Neste ponto, o controlador central deveria atuar e, com o protocolo RAMP, comunicar mudanças para atenuar estas discrepâncias. Apesar de ainda não ter sido possível implementar este tipo de ações (está previsto numa segunda interação), pode ser possível avaliar já de acordo com os dados obtidos, ou seja, o teste 3.

Caso exista um crescente aumento no tempo de envio dos dados ou um comboio deixe subitamente de comunicar, o controlador central deve atuar para atenuar os problemas causados por um destes cenários. Considerando o caso em que o router n6 falhe (deixe de estar ligado), os comboios n3 e n4 não têm forma de se ligar ao router da locomotiva (n5), o controlador central informa o n3 de que passa a ser o *master* e terá de assumir a ligação com o controlador central. O comportamento passa a ser exatamente o mesmo que o que a locomotiva tinha e o tempo de transmissão mantém-se semelhante aos dos quadros acima apresentados.

Estes primeiros testes permitiram perceber de que forma o RAMP, dentro do SDRm, são preliminares e pretendem mostrar as potencialidades do SDN aplicado à ferrovia. Apesar de ser evidente que a ligação direta é mais eficaz no envio dos dados, a solução do teste 1 é modular, dinâmica e não necessita de ter uma complexidade de hardware muito elevada. No caso 2, a solução é eficaz para envio dos dados, mas torna cada comboio autónomo e necessita de hardware mais específico para permitir uma comunicação entre o comboio e o controlador central. Atualmente, ambas as soluções poderão ser interessantes para a ferrovia, mas o controlo passa todo para o controlador central, no sentido de gerir não só o comboio como também a rede ferroviária no geral, ajustando sempre para as necessidades do momento.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com a ferrovia a evoluir, torna-se evidente a necessidade de ter um conhecimento mais alargado do estado dos comboios. A tecnologia 5G bem como outros paradigmas tais como o SDN e a própria digitalização do meio ferroviário permitem alargar o espectro de trabalhos possíveis de realizar. Assim, a proposta da nova variante do

SDN, o *Software-Defined for Railway Monitorization*, visa introduzir na ferrovia um paradigma utilizado na área das telecomunicações com ligeiras modificações. Através de um protocolo para gestão ferroviária (RAMP), o objetivo deste novo paradigma é abstrair todos os sistemas ferroviários e considerar que existe um controlador central a gerir e controlar todos os comboios da rede. Ao mesmo tempo, esse sistema controla de que forma cada comboio envia os seus dados e como é que os trata.

Nesta primeira fase do SDRm, apenas foi abordada a questão da formação de composições e de que modo é que comunicam os sistemas entre si, tendo sido avaliado o tempo que cada comboio demora a enviar os dados até ao controlador central. Conforme mencionado na secção anterior, as ligações diretas de cada comboio para o controlador central são mais rápidas (teste 2). No entanto, questões de uniformização de dados de uma única composição (i.e., vários comboios) teria de ser o controlador central a tratar. Nesse sentido, uma solução como a do teste 1 é mais vantajosa porque permite que a composição já seja capaz de juntar todos os dados dos comboios que a compõem e, ao mesmo tempo, poder comprimir os dados para enviar apenas as informações necessárias.

Mesmo assim, uma das vantagens do SDRm é que o controlador central pode (e deve) ser capaz de mandar ordens para os vários comboios no sentido de mudarem as formas de envio caso sejam detetados problemas. Em situações normais o controlador central pode não necessitar que sejam recolhidos muitos dados e, por conseguinte, informar os comboios para reduzir a frequência de recolha, ou vice-versa.

Os próximos passos deste sistema é melhorar o controlador central no sentido de ser capaz de avaliar e tomar as ações necessárias, através, por exemplo, do uso de aprendizagem computacional, estudar a melhor forma de comunicação para aplicações terceiras ser também uniformizada (através de um API REST ou outra semelhante), e definir, com maior detalhe, de que modo tanto o SDRm e o RAMP funcionam, através das especificações.

7 AGRADECIMENTOS

This work is funded by national funds through the FCT - Foundation for Science and Technology, I.P., within the scope of the project CISUC - UID/CEC/00326/2020 and by European Social Fund, through the Regional Operational Program Centro 2020

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OECD (2022), Passenger transport (indicator). doi: 10.1787/463da4d1-en (Acedido a 19 de março, 2022)
2. Adell, G. M. (2018). The autonomous train: A game changer for the railways industry. *Proceedings of 2018 16th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications, ITST 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ITST.2018.8566728>
3. Zhu, H., Gao, S., & Dong, H. (2019). Improving Train Driving Performance under Disturbances by Intelligent Driver Advisory System. *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation, ICIRT 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641628>
4. Bernal, E., Spiriyagin, M., & Cole, C. (2020). Ultra-low power sensor node for on-board railway wagon monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3011132>
5. Jia, Y., Liang, K., Wang, P., Ji, K., & Xu, P. (2020). Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection. *IET Science, Measurement & Technology*, 14(6), 711–717. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5651>
6. Bai, Y., Yang, J., Wang, J., & Li, Q. (2020). Intelligent Diagnosis for Railway Wheel Flat Using Frequency-Domain Gramian Angular Field and Transfer Learning Network. *IEEE Access*, 8, 105118–105126. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000068>
7. Berbineau, M., Behaegel, R., Garcia-Loygorri, J. M., Torrego, R., D’Errico, R., Sabra, A., Yan, Y., & Soler, J. (2021). Channel Models for Performance Evaluation of Wireless Systems in Railway Environments. *IEEE Access*, 9, 45903–45918. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066112>
8. Kreutz, D., Ramos, F. M. v., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2015). Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 14–76. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999>