

# Load balancing and peak shaving on multi-vehicle electric charging systems

Agentes e Inteligência Artificial Distribuída - Grupo 43

Carlos Jorge Direito Albuquerque - up201706735

Maria Inês Fernandes Alves - up201605335

Tito Alexandre Trindade Griné - up201706732

# Descrição do problema

Nos últimos anos, a quantidade de **veículos elétricos** em circulação tem vindo a aumentar. Por esta razão, têm vindo a surgir sistemas para promover a evolução das *smart grids* nas cidades. Um desses sistemas é o **vehicle-to-grid** que consiste na utilização dos veículos elétricos em carregamento como baterias disponíveis para diminuir o esforço sobre as centrais elétricas, promovendo assim **melhor eficiência energética e menor poluição**.

Assim sendo, criamos um sistema para simular o **carregamento de diversos tipos de veículos elétricos** com o objetivo de alcançar **load balancing** entre os veículos e **peak shaving** da grelha elétrica, melhorando a eficiência energética do sistema em geral.

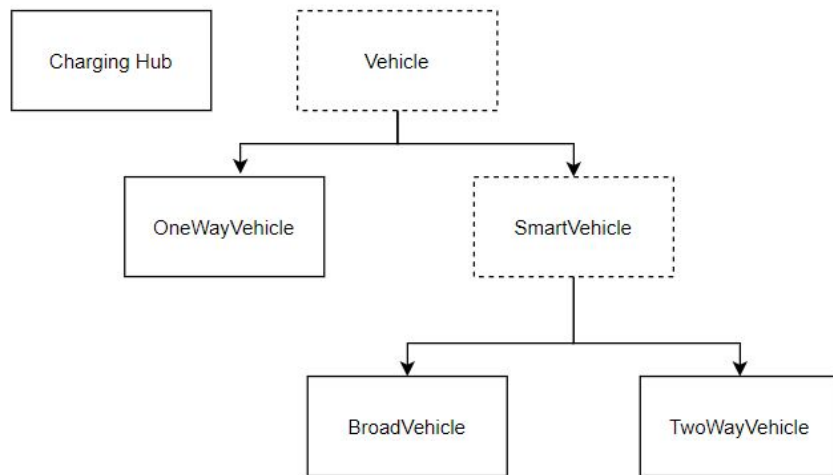
Implementamos **três tipos de carros**, cada um com capacidades de comunicação distintas, e um **posto de carregamento**, que coordena os carregamentos e abstrai as variações da rede elétrica. Este último é também o responsável por pedir a bateria aos veículos durante os picos de exigência da rede elétrica.

Pretendemos usar os resultados obtidos para justificar a adesão a este tipo de sistemas, que consideramos serem o futuro das cidades inteligentes e das *smart grids*.

# Esquema global do sistema

Foram implementados no sistema os seguintes agentes:

- **Charging Hub:** posto de carregamento, responsável não só por gerir a carga a alocar aos vários veículos do sistema, mas também por abstrair as variações de esforço da rede;
- **Vehicle (abstract):** representa qualquer veículo do sistema;
- **One-Way Vehicle:** veículos simples que apenas enviam o seu estado de bateria ao *charging hub*;
- **Smart Vehicle (abstract):** veículos mais complexos com capacidade de comunicação superior, e suporte da tecnologia vehicle-to-grid (V2G);
- **Two-Way Vehicle:** smart vehicle capaz de comunicar apenas com o *charging hub*.
- **Broad Vehicle:** smart vehicle capaz de comunicar com o *charging hub* bem como veículos do mesmo tipo.



# Interação e protocolos

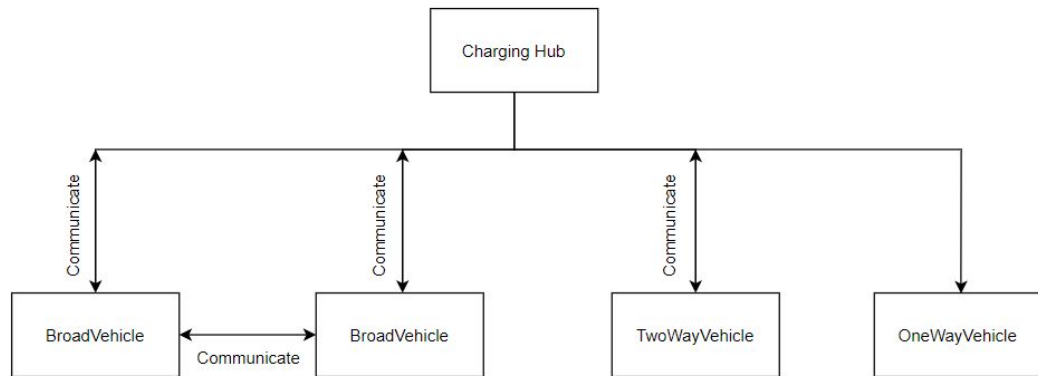
Existem, essencialmente, **dois grandes tipos de comunicação**:

**Vehicle ↔ Charging Hub:**

- **FIPA Subscribe** - Utilizado para o *Charging Hub* saber que veículos se encontram a carregar, e notificar os subscritores (i.e. os veículos) da carga alocada a cada um.
- **FIPA Request** - Utilizado para o *Charging Hub* pedir o estado de cada veículo e confirmar que estes se encontram ainda ligados.
- **FIPA Contract Net** - Utilizado pelo *Charging Hub* para pedir aos veículos com suporte V2G para enviarem propostas de quanto podem disponibilizar de carga para alimentar a grelha.

**Broad Vehicle ↔ Broad Vehicle:**

- **FIPA Contract Net** - O veículo elegido como líder pede as propostas de cada outro veículo dos seus próprios altruist factors e envia contrapropostas caso não seja o ótimo, ou aceita a proposta se for.



# Carregamento do veículo

A simulação do carregamento da bateria realiza-se através do protocolo **FIPA Subscribe**.

- O veículo (*Initiator*) manda uma mensagem **Subscribe**, dizendo que quer carregar a sua bateria;
- O *Charging Hub* (*Responder*) lida com este pedido, aceitando (**Agree**) se ainda tiver uma estação de carregamento disponível ou recusando (**Refuse**) caso contrário;
- O *Charging Hub* vai, para cada veículo ligado (i.e. subscrito) e a cada tick desencadeado pelo **Timer Behaviour**, iniciar uma ronda de carregamento. Na prática, inicia um protocolo **FIPA Request**, pedindo o estado de cada veículo;
- Cada veículo responde com um **Agree**, se ainda estiver ligado, seguido de um **Inform** com o objeto **StatusResponse** que contém informação sobre a bateria (capacidade atual e máxima), fator de altruísmo e disponibilidade para carregar a grelha. Caso o veículo decida deixar de carregar e abandonar o sistema, responde com um **Cancel** em vez de um **Agree**;
- Ao receber o estado de todos os veículos ligados, o *Charging Hub* irá **alocar carga** a cada um conforme as informações recolhidas.

# Carregamento da grelha

- **Charging Hub** analisa o sistema, verificando se os **valores da grelha** naquele momento se encontram num **pico de exigência energética**, isto é, se a procura na grelha excede **80% do máximo** que o sistema pode utilizar.
- Caso isto se verifique, o **Charging Hub** irá iniciar o protocolo **FIPA Contract Net** com os veículos que permitem ceder energia à grelha. Sendo o *Initiator*, faz um **Call for Proposals (CFP)** a cada veículo, pedindo que envie uma **proposta de carga a ceder** à grelha.
- Um veículo só pode fazer uma proposta se tiver carga suficiente para tal - neste contexto, só são enviadas as propostas de veículos cuja **percentagem atual de bateria é superior a 85%**, caso contrário é enviado um **Refuse**.
- As propostas são ordenadas numa **fila de prioridade**, de modo a utilizar, primeiro, as propostas com **carga mais elevada**.
- O **Charging Hub** aceita estas propostas até obter a carga total que necessita para **reduzir** o pico energético para 80%.
- Cada veículo recebe uma confirmação (**Accept Proposal**) de que a proposta foi aceite, procedendo-se então ao carregamento da grelha, ou uma rejeição (**Reject Proposal**) caso já não seja necessário o seu contributo.

# Comunicação entre veículos

- Os vários veículos do tipo **Broad Vehicle** comunicam entre si com o objetivo de ajustar os valores dos seus **fatores de altruísmo** de forma mais **justa**. Até aqui, o fator de altruísmo era uma propriedade estática dos veículos inteligentes, mas com este protocolo passa a ser ajustável.
- O protocolo processa-se da seguinte forma:
  - a. Ao receber um pedido de estado por parte do Charging Hub, todos os Broad Vehicles tenta chegar a um **consenso**;
  - b. Para tal, é elegido um **líder** de entre os veículos (aquele cujo nome é lexicograficamente menor);
  - c. Este inicia um **FIPA Contract Net**, enviando **Call for Proposal (CFP)** a todos os outros;
  - d. Cada um aceita a comunicação, **propondo o seu fator de altruísmo** ao líder;
  - e. Este, uma vez tendo todos os fatores de altruísmo dos Broad Vehicles no sistema, efetua uma **manipulação** dos mesmos com base na **necessidade** de cada veículo, ou seja, aos veículos cuja percentagem de bateria está acima da média do sistema vai ser aumentado o fator de altruísmo (i.e. cedem mais energia) e aos restantes irá ser diminuído, tentando assim manter a média dos fatores de altruísmo;
  - f. Assim, o líder fica com o fator de altruísmo que cada veículo deve ter (incluindo ele próprio) e envia um **Reject Proposal** para os veículos cujo fator de altruísmo foi alterado e um **Accept Proposal** aos veículos cujo fator de altruísmo não foi manipulado (porque o algoritmo acabou por não os conseguir alterar);
  - g. Por fim, já com os fatores de altruísmo melhorados, os Broad Vehicles enviam o seu **estado** ao Charging Hub para alocação de energia.
- Desta forma, os Broad Vehicles são capazes de melhorar o sistema para que a alocação seja mais justa e eficiente.

# Estratégias utilizadas

Algoritmo para alocação de carga:

1. Uma vez obtida a capacidade atual e máxima de cada veículo ligado, o Charging Hub começa por calcular o total de carga em falta no sistema, isto é, o somatório das cargas em falta de cada veículo.
2. Em seguida, é calculada a prioridade de cada veículo sendo colocados numa PriorityQueue ordenados por ordem decrescente de prioridade. A prioridade de cada veículo é dada pela seguinte fórmula, em que  $m$  é a capacidade máxima do veículo e  $c$  a capacidade atual.

$$\frac{m - c \times \frac{m - c}{m}}{\sum_i^n m_i - c_i}$$

3. Inicialmente é atribuído a cada veículo a *fairShare*, que é igual à carga disponível para ceder a dividir pelo número de carros no sistema. Aos veículos com um *altruistFactor* superior a 0, é-lhes retirada desta *fairShare* o equivalente a *altruistFactor* / 2 por cento, e adicionado a uma variável que acumula o total que é cedido por estes carros.
4. Finalmente, percorre-se a PriorityQueue acrescentando à carga alocada a cada carro uma percentagem do que foi cedido pelos carros altruístas, baseada na sua prioridade, mais concretamente, a sua prioridade a dividir pelo somatório de todas as prioridades.



# Outros mecanismos

Utiliza-se o **DF (Directory Facilitator) Service**, i.e. o serviço de páginas amarelas, em duas situações distintas:

1. Para os veículos encontrarem o posto de carregamento - assim que o sistema é iniciado, o agente *Charging Hub* regista-se nas páginas amarelas, oferecendo o serviço de carregamento (*chub-service*); cada veículo procura por este serviço quando entra no sistema para iniciar o carregamento.
2. Para os Broad Vehicles se encontrarem uns aos outros - como os veículos podem entrar a meio de carregamentos, eles registam o seu serviço (*broad-service*) após receberem o primeiro carregamento, a partir do qual passam a estar visíveis para os outros Broad Vehicles no sistema.

Faz-se também uso de um **Ticker Behaviour** para simular a passagem de tempo. Este behaviour é implementado pela classe **Timer Behaviour**, que faz parte do agente Charging Hub que é, como já foi referido, o que despoleta cada ronda de carregamento.

Por fim, para permitir o fluxo de carros, ao iniciar o sistema é criada uma **TimerTask** que corre periodicamente e tenta adicionar novos veículos ao sistema. Estes são criados e tentam ligar-se ao Charging Hub. Caso não haja estações de carregamento suficientes, o agente não se consegue inscrever e auto termina-se.

# Experiências realizadas e análise dos resultados

Pelos dados, conclui-se que ao incluir o fator de altruísmo no método de alocação de carga faz com que, em geral, os carros abandonem o posto de carregamento com mais percentagem de bateria carregada. Os veículos TwoWay aparentam conseguir carregar mais em termos absolutos de bateria, o que pode indicar que os fatores de altruísmo obtidos pelo consenso entre os veículos Broad oferecem uma melhoria reduzida na percentagem de bateria com que os veículos saem em detrimento de carregarem menos em termos absolutos.

Como seria de esperar, ao suportarem a tecnologia V2G, tanto os TwoWay como os Broad auxiliam a reduzir o pico de procura energética e isso reflete-se num menor valor pago pelo carregamento.

	OneWay	TwoWay	Broad
Avg Peak Reduction	0%	11.58%	9.75%
Avg Battery Delta	16.96 kWh	18.47 kWh	16.67 kWh
Avg Battery Percentage	76.61%	78.26%	78.47%
Avg Price	27.68€	25.45€	25.40€

Podemos ver que um sistema com maior prevalência de altruísmo obtém melhores resultados tanto no valor absoluto de carga obtida (**Avg Battery Delta**), tanto na **percentagem de bateria** com que os carros abandonam o posto de carregamento. Como seria de esperar, o altruísmo não tem um impacto estatisticamente significativo no **preço**, uma vez que as variações verificadas podem ser explicadas simplesmente pelo aumento da bateria carregada. Uma possível consequência de uma distribuição mais igualitária é que é mais difícil ter veículos que atinjam percentagem de carregamento elevadas o suficiente para aceitarem carregar a grelha o que poderá explicar a aparente diminuição da **peak reduction** com o aumento do altruísmo.

	Two Way low altruism	Broad low altruism	Two Way average altruism	Broad average altruism	Two Way high altruism	Broad high altruism
Avg Peak Reduction	10.92%	7.92%	11.58%	9.75%	6.38%	11.33%
Avg Battery Delta	16.43	16.74	18,47	16.67	17.92	19.47
Avg Battery Percentage	75,61%	77.03%	78.26%	78.47%	79.33%	77.81%
Avg Price	25,41€	24.71€	25.45€	25.40€	24.16€	25.66€

Nestes últimos cenários pretendemos avaliar o impacto do altruísmo na quantidade de energia cedida à rede e o impacto desta última no estado final de carregamento das baterias. Assim, concluímos que:

1. Maior altruísmo conduz a mais energia cedida à rede, possivelmente porque há mais veículos perto do carregamento total;
2. Ao contrário do que seria de esperar, ceder mais energia à rede não afeta o carregamento dos veículos, i.e. os casos em que há maior *Peak Reduction* têm uma *Battery Percentage* final muito próxima do caso que menos *Peak Reduction* teve;
3. Ceder mais energia à rede reduz ligeiramente o preço, mesmo quando o *Battery Delta* é mais elevado, ou seja, há mais quantidade de energia a ser carregada e o preço pago é menor

Achamos estes resultados bastantes encorajadores para a adesão em larga escala ao V2G, revelando propriedades promissoras em sistemas idênticos ao implementado

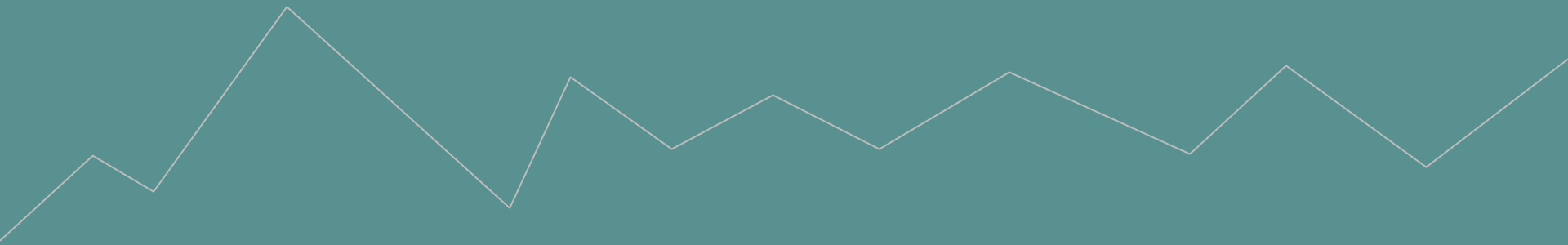
	Two Way low altruism all enabled V2G	Broad low altruism all enabled V2G	Two Way high altruism all enabled V2G	Broad high altruism all enabled V2G	Two Way high altruism some enabled V2G	Broad high altruism some enabled V2G
Avg Peak Reduction	14.71%	14.71%	15.38%	15.96%	6.38%	11.33%
Avg Battery Delta	17.25 kWh	16.45 kWh	17.80 kWh	18.90 kWh	17.93 kWh	19.48 kWh
Avg Battery Percentage	77.23%	77.36%	78.76%	78.99%	79.33%	77.81%
Avg Price	26.75€	24.70€	23.68€	24.24€	24.16€	25.67€

# Conclusão

Uma vez concluído este projeto, consideramos que atingimos os objetivos relativamente às interações que queríamos modelar e as várias condições que propusemos estudar. Apesar de os dados não revelarem melhorias tão substanciais quanto desejaríamos, mostram na mesma que a tecnologia V2G é eficaz na redução de picos energéticos contribuindo para uma diminuição do preço pago por cada carro. E que a existência de carros altruístas melhora o sistema em geral, nomeadamente a percentagem de bateria com que um carro abandona o posto.

Numa continuação deste trabalho, tentariamos melhorar o algoritmo de reajuste dos fatores de altruísmo, implementando possivelmente uma negociação entre os veículos com base em funções de utilidade. Acrescentaríamos também um desconto no preço a veículos altruístas que motivasse este comportamento e tornasse a negociação mais interessante.

# Informação adicional



# Exemplos de execução

```
⚠ System - 3 vehicles attempted to connect to the charging hub.  
⚠ System - 4 vehicles attempted to connect to the charging hub.  
⚠ System - round 1  
🕒 Local Time: 07:45  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.  
⚡ Charging Hub - received agree: Connected.
```

Entrada dos veículos no sistema e ligação ao Charging Hub

```
⚡ Charging Hub - received inform from vehicle_  
  
Vehicle Status:  
  · Current Capacity = 38  
  · Max Capacity = 88  
  · Altruistic Factor = -1.0
```

Estado do veículo

```
🔌 Broad Vehicle vehicle_7d462f6d-21d5-4b9a-b8af-178f4ec5fc90 - received V2G confirmation:  
  
Vehicle to Grid Conditions:  
  · Discount price = 0.3  
  · Shared load = 22  
  
⚡ Charging Hub - vehicle vehicle_7d462f6d-21d5-4b9a-b8af-178f4ec5fc90 confirms charging the grid.
```

Carregamento da grelha

```
⚡ Two Way Vehicle vehicle_721631c6-39f8-44a9-ac6a-4952384e6ffc - subscription inform: 10

⚡ One Way Vehicle vehicle_c54ef75c-47a9-4446-8807-a9a4ffaaa31c - subscription inform: 12

⚡ Broad Vehicle vehicle_97bc65a0-a474-45ce-831d-b4508af5c906 - subscription inform: 9
```

## Alocação de carga aos vários veículos

```
⚡ Broad Vehicle vehicle_43e7bf73-c458-41a6-8cf0-819ccd27bd51 - I am the leader!

⚡ Charging Hub - received agree: Connected.

⚡ Broad Vehicle vehicle_43e7bf73-c458-41a6-8cf0-819ccd27bd51 - sending call for proposals

⚡ Charging Hub - received agree: Connected.

⚡ Broad Vehicle vehicle_6daca080-c2f3-4332-a6d7-40bf10af3d7b - received call for proposals of broad consensus

⚡ Broad Vehicle vehicle_6daca080-c2f3-4332-a6d7-40bf10af3d7b - altruistic factor proposal was accepted. Keeping altruist factor as 1.0
```

## Comunicação entre veículos Broad Vehicle

```
⚠ System - vehicle vehicle_d9cb23a8-684e-4527-af0c-049a24b93a46 left the charging hub.

⚠ System - vehicle vehicle_2dfba4e7-6fa2-45bc-9feb-7e2a596caca0 left the charging hub.
```

## Saída de veículos do sistema



# Classes Implementadas - Grid

- **Grid:** representa a grelha energética do sistema. Através dela conseguimos obter os valores de exigência energética num momento específico, e saber se se encontra em pico de exigência.
- **ChargingHub:** para além de conter informação sobre a grelha, trata da distribuição de carga pelos vários veículos ligados ao posto. Contém um preço definido, que corresponde ao valor a pagar por kW de carga disponibilizada. Cada carro que cede bateria à grelha recebe um desconto neste preço.
- **ChargingConditions:** utilizado para comunicar aos veículos as condições de carregamento (carga e preço).
- **Vehicle2GridConditions:** semelhante a ChargingConditions, mas utilizado para carregamento da grelha energética por parte dos veículos, tendo a carga a ser cedida e o preço a que vai ser paga essa carga.

# Classes Implementadas - Grid (behaviours)

- **TimerBehaviour:** estende a classe **TickerBehaviour**. Simula a passagem do tempo, atualizando o estado do sistema periodicamente. Cada tick representa um TICK\_RATIO de uma hora (e.g se TICK\_RATIO = 0.5, cada tick equivale a meia hora na simulação).
- **SubscriptionBehaviour:** estende a classe **SubscriptionResponder**, atuando, então, como Responder do FIPA Subscribe protocol, utilizado pelo Charging Hub para lidar com pedidos de subscrição dos vários veículos, e atualizar cada veículo de quanta carga lhe é disponibilizada.
- **RequestStatusBehaviour:** estende a classe **AchieveREInitiator**, atuando, então, como Initiator do FIPA Request protocol, iniciado pelo Charging Hub para pedir o estado dos vários veículos a ele ligados.
- **Vehicle2GridBehaviour:** estende a classe **ContractNetInitiator**, atuando, então, como Initiator do FIPA Contract Net protocol, para pedir e lidar com propostas de cedência de carga à grelha pelos veículos que tal o permitem.

# Classes Implementadas - Grid

- **Constants:** contém todas as constantes utilizadas no código, incluindo constantes para estatística (criação dos ficheiros .csv) e características do sistema (número de carros, ticks, número de estações de carregamento, preço, exigência energética da grelha ao longo do ano, etc).
- **Data:** contém os métodos utilizados para escrever os dados recolhidos em cada execução num ficheiro .csv, e a criação destes mesmos ficheiros.
- **Utilities:** conjunto de vários métodos úteis para o sistema, desde print de mensagens de vários tipos, registo de serviços (Directory Facilitator), e obtenção de valores “random” que seguem distribuições uniformes ou normais, para introduzir variações no sistema.

# Classes Implementadas - Vehicle

- **Vehicle:** classe abstrata representativa de um veículo do sistema e contém informação sobre o seu estado de bateria.
- **SmartVehicle:** estende a classe Vehicle. É, também, uma classe abstrata e representa um tipo de veículo que, para além de ter um fator de altruísmo associado, tem a capacidade de carregar a grelha.
- **BroadVehicle:** estende SmartVehicle. O seu fator de altruísmo pode ser alterado aquando de um consenso entre vários carros deste tipo.
- **TwoWayVehicle:** estende SmartVehicle. Este tipo de veículo contém um fator de altruísmo fixo.
- **OneWayVehicle:** estende a classe Vehicle mas, ao contrário de SmartVehicle, não contém um fator de altruísmo nem consegue comunicar com a grelha.
- **BroadCarInfo:** utilizado na troca de informação entre carros deste tipo. Contém o AID, o fator de altruísmo e a percentagem de carga do veículo.
- **StatusResponse:** contém informação sobre cada carro, incluindo estado da bateria, fator de altruísmo e se permite o carregamento da grelha, a ser utilizado na comunicação com o Charging Hub.

# Classes Implementadas - Vehicle (behaviours)

- **BroadConsensusInitiator:** estende a classe **ContractNetInitiator**, atuando como Initiator do FIPA Contract Net protocol, para pedir e lidar com propostas de fatores de altruísmo aquando da comunicação entre veículos do tipo Broad Vehicle.
- **BroadConsensusResponder:** estende a classe **ContractNetResponder**, atuando como Responder do FIPA Contract Net protocol, para enviar propostas de fatores de altruísmo aquando da comunicação entre veículos do tipo Broad Vehicle.
- **BroadStatusResponseBehaviour:** estende a classe **AchieveREResponder**, atuando como Responder do FIPA Request protocol, para enviar ao Charging Hub o estado do veículo do tipo Broad Vehicle..
- **OneWayStatusResponseBehaviour/TwoWayStatusResponseBehaviour:** semelhantes ao behaviour acima, para os veículos do tipo respetivo.
- **Vehicle2GridBehaviour:** estende a classe **ContractNetResponder**, atuando como Responder do FIPA Contract Net protocol, para enviar propostas da carga a ceder à grelha para o Charging Hub.
- **SubscriptionBehaviour:** estende a classe **SubscriptionInitiator**, atuando como Initiator do FIPA Subscribe protocol, iniciado pelo veículo para o carregamento da sua bateria pelo Charging Hub.