

INESCTEC
TECNOLOGIA E CIÊNCIA
| LABORATÓRIO ASSOCIADO

COORDENADO POR
INESCPORTO



O impacto do autoconsumo na rede elétrica/Smart Grid

Manuel Matos mmatos@inesctec.pt

INESC TEC & FEUP

(com JA Peças Lopes, André Madureira, Clara Gouveia, Pedro Barbeiro)

Seminário APESF: O autoconsumo e sua envolvente | 29 janeiro 2015

Investigação e Desenvolvimento Tecnológico | Transferência e Valorização de Tecnologia | Formação Avançada
Consultoria | Pré-incubação de empresas de base tecnológica

Legislação sobre autoconsumo (DL 153/2014, de 20/10)

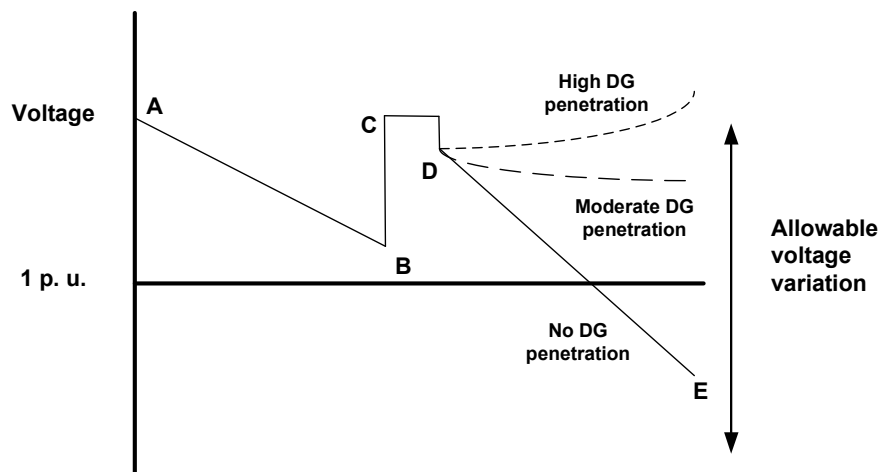
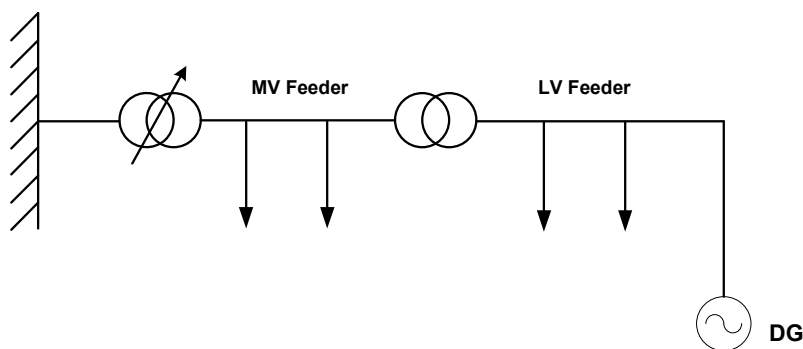
- Produção para autoconsumo (UPAC)
 - Excedentes podem ser vendidos à rede
- Pequena produção de eletricidade (UPP)
 - A partir de energias renováveis
 - Só uma tecnologia de produção
 - Potência de ligação até 250 kW
 - Venda total à rede
- Atividade é livre
 - Registo prévio, certificado de exploração
 - **Algumas exceções**

Impacto de UPAC e UPP

- Quando a produção coincide temporalmente com o consumo
 - Melhoria dos perfis de tensão
 - Alívio de congestionamentos
 - Diferimento de investimentos
- Quando a produção é alta e o consumo baixo
 - Inversão de sentido em PT ou SE
 - Problemas de tensão
 - **Disparo de proteções dos dispositivos de produção**
 - **Corte de produção renovável**
 - **Intermitência**

Problemas de tensão

- Excesso de geração (quando o consumo é baixo) pode originar problemas de tensão em redes eletricamente “fracas”



A: Voltage kept constant by HV/MV distribution transformer tap-changer

A – B: Voltage drop in the MV feeder due to the loads

B – C: Voltage increase due to taps in the MV/LV distribution transformer tap-changer

C – D: Voltage drop in the MV/LV distribution transformer

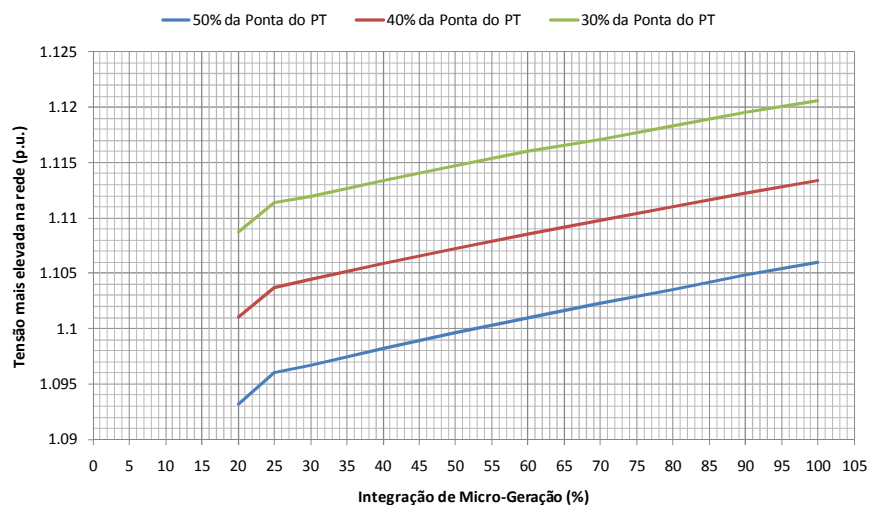
D – E: Voltage drop in the LV feeder due to the loads *OR* Voltage rise in the LV feeder due to DG

Estudo de impacto de Micro-Geração – Metodologia

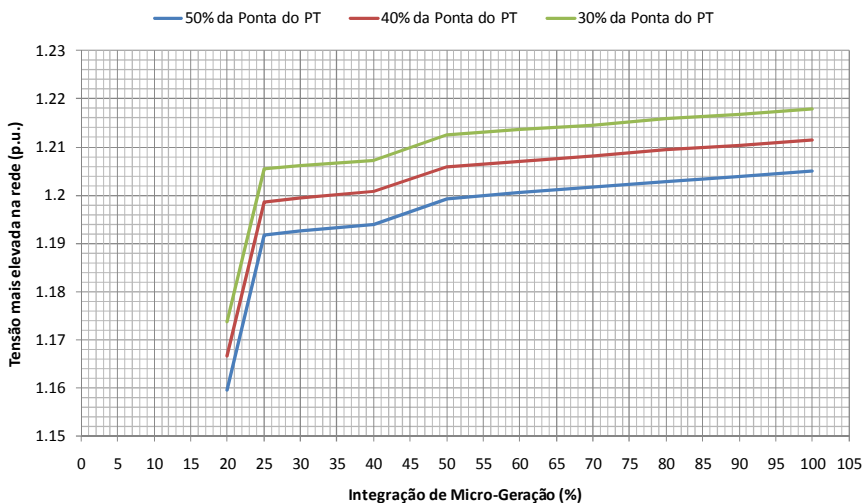
- Para cada rede de distribuição de BT típica:
 1. Ordenar os locais eletricamente mais afastados (e próximos) do barramento de BT do Posto de Transformação;
 2. Assumir um cenário de carga (30 %, 40% e 50 % da Potência de ponta da respetiva rede);
 3. Definir o cenário de estudo (caso 1 ou 2);
 4. Para cada valor de percentagem de integração de μG
 - Efetuar a instalação das unidades de μG na rede de distribuição de BT, de acordo com a listagem definida no ponto 1 (em cada nó da rede de BT onde é considerada a ligação de uma unidade de μG , assume-se que esta produz um valor de potência ativa igual à sua potência nominal);
 - Resolução do problema do trânsito de potências e avaliação do perfil de tensão, com especial interesse para o registo da tensão mais elevada na rede.
- **Caso 1:** Cada consumidor pode instalar no máximo 50% da respetiva potência contratada, com um limite de 5.75 kW ($\cos\phi = 1$);
- **Caso 2:** Cada consumidor pode instalar no máximo uma potência de μG igual à respetiva potência contratada ($\cos\phi = 1$).

$$\% \mu G = \frac{P_{\mu G}}{S_{n_{PT}}}$$

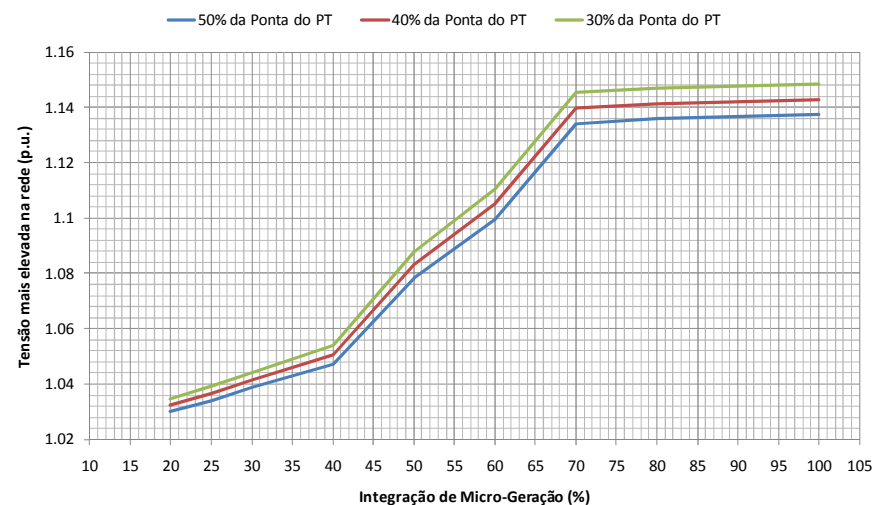
Estudo de impacto de Micro-Geração – PT 100 kVA



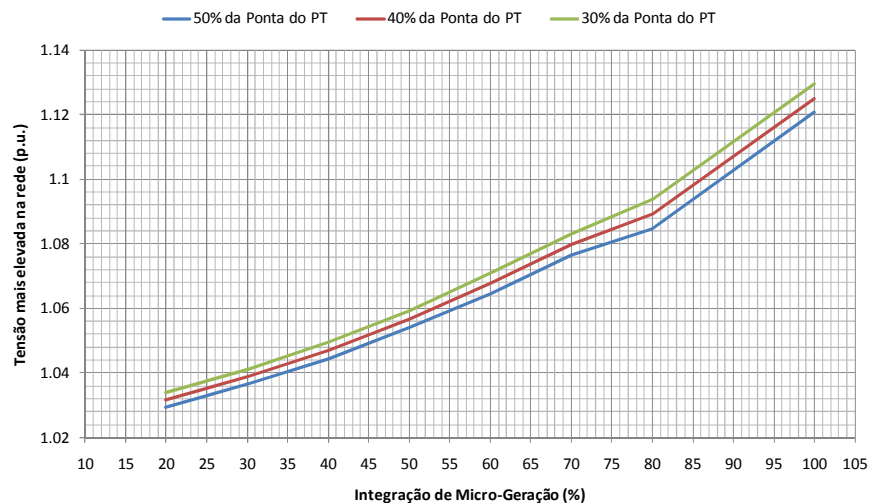
Caso 1 e μ G nos nós electricamente mais distantes



Caso 2 e μ G nos nós electricamente mais distantes



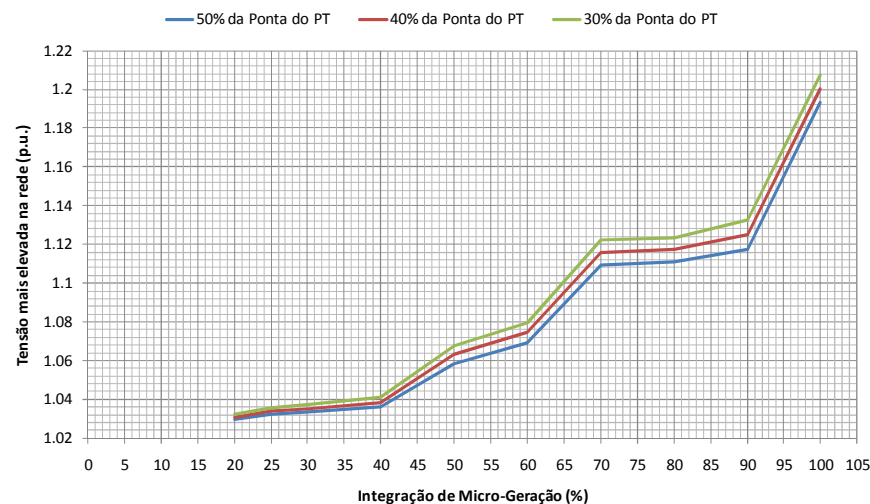
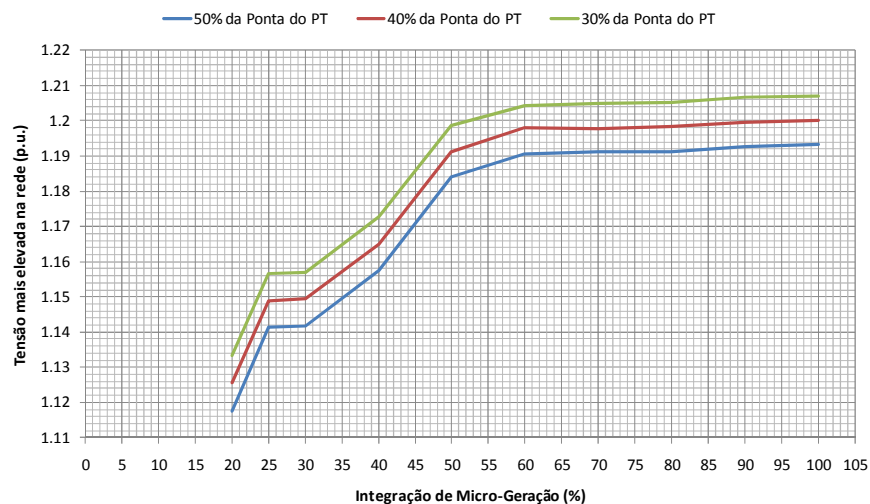
Caso 1 e μ G nos nós electricamente mais próximos



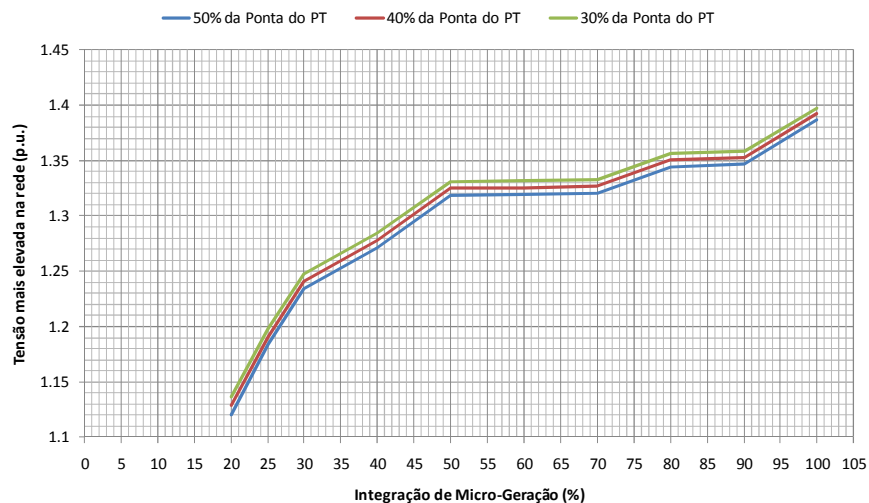
Caso 2 e μ G nos nós electricamente mais próximos



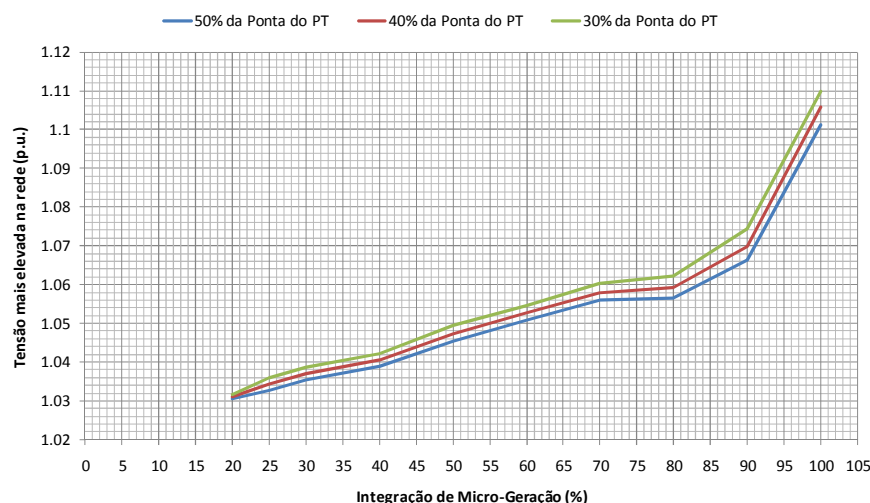
Estudo de impacto de Micro-Geração – PT 400 kVA



Caso 1 e μ G nos nós electricamente mais distantes



Caso 1 e μ G nos nós electricamente mais próximos



Caso 2 e μ G nos nós electricamente mais distantes

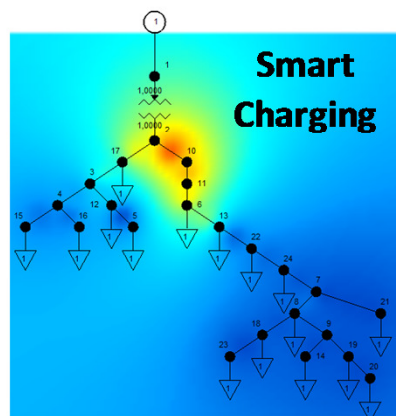
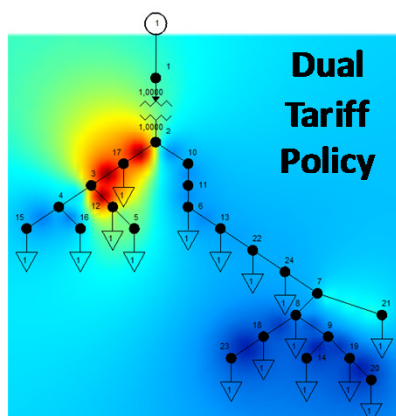
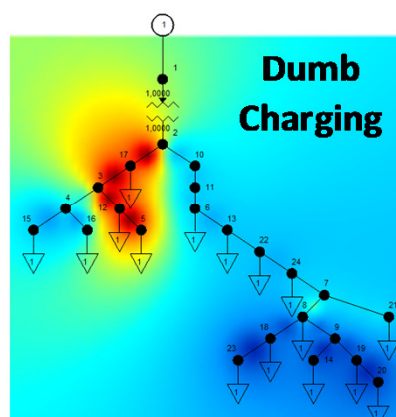
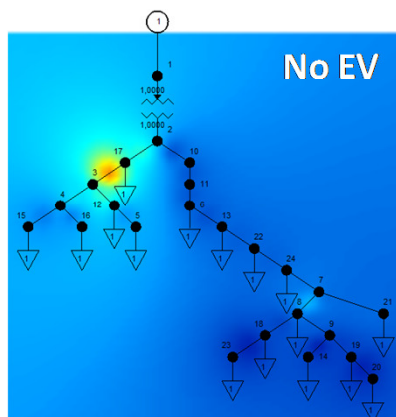
Caso 2 e μ G nos nós electricamente mais próximos



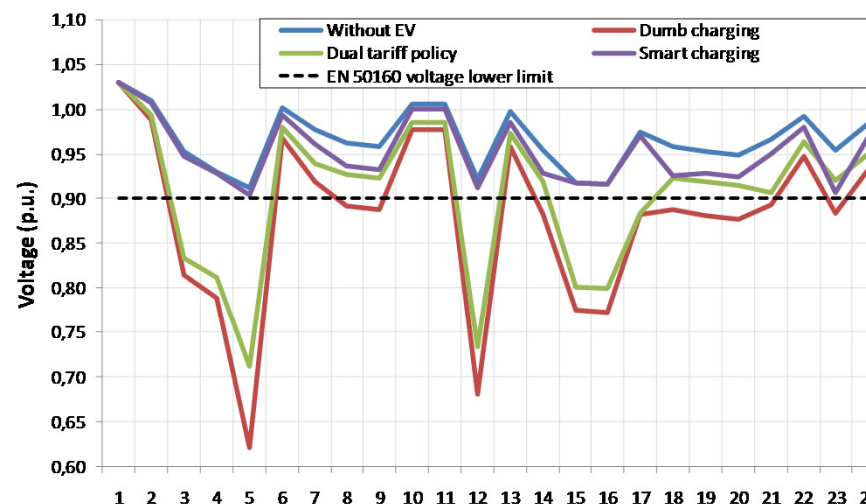
Avaliação do Impacto dos VE nas Redes Elétricas

Impactos:

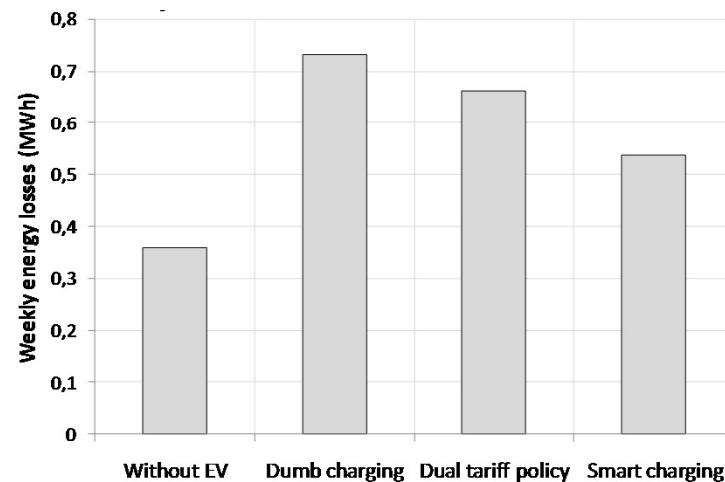
- Corrente nas linhas na hora de ponta



- Perfil de tensão na hora de ponta



- Perdas semanais



Estudo de Impactos da μ G a Curto e Longo Prazo nas Redes de Distribuição

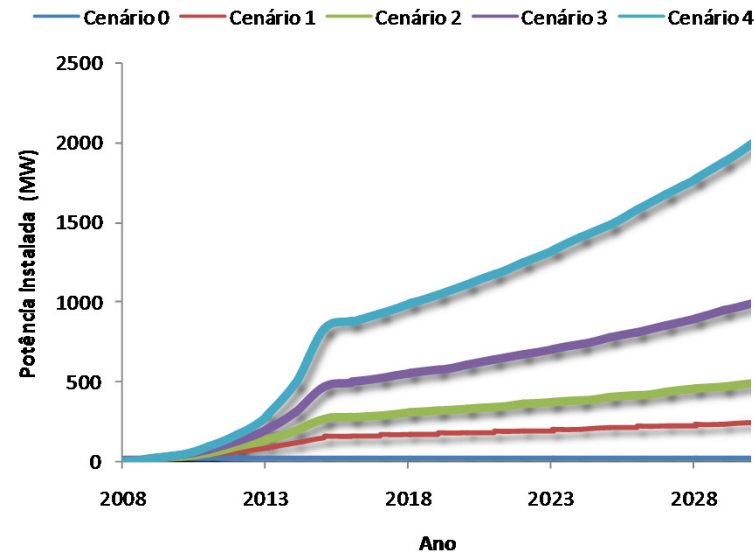
▪ Elaboração de cenários: Evolução da potência instalada de μ G

- Admitiu-se a existência de 10 MW instalados a nível nacional no ano inicial (2008)
- Definiram-se 5 cenários de evolução de μ G onde, em três deles, se consideram taxas de integração bastante acima do disposto no Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro:

- Cenário 0 (cenário base) – potência de μ G instalada a nível nacional é mantida constante nos 10 MW até 2030;
- Cenário 1 – potência de μ G instalada a nível nacional cresce à taxa de 20% até 2015 (cenário referente ao constante do parágrafo 8 do Artigo 11.º do Decreto-Lei n.º 363/2007) e à taxa de 3% desde 2016 até 2030 atingindo-se, no último ano, uma potência instalada de 250 MW;
- Cenário 2 – potência de μ G instalada a nível nacional cresce à taxa de 34% até 2015 e à taxa de 4% desde 2016 até 2030 atingido -se, no último ano, uma potência instalada de 500 MW;
- Cenário 3 – potência de μ G instalada a nível nacional cresce à taxa de 49% até 2015 e à taxa de 5% desde 2016 até 2030 atingido -se, no último ano, uma potência instalada de 1000 MW;
- Cenário 4 – potência de μ G instalada a nível nacional cresce à taxa de 65% até 2015 e à taxa de 6% desde 2016 até 2030 atingido -se, no último ano, uma potência instalada de 2000 MW.

Estudo de Impactos da μ G a Curto e Longo Prazo nas Redes de Distribuição

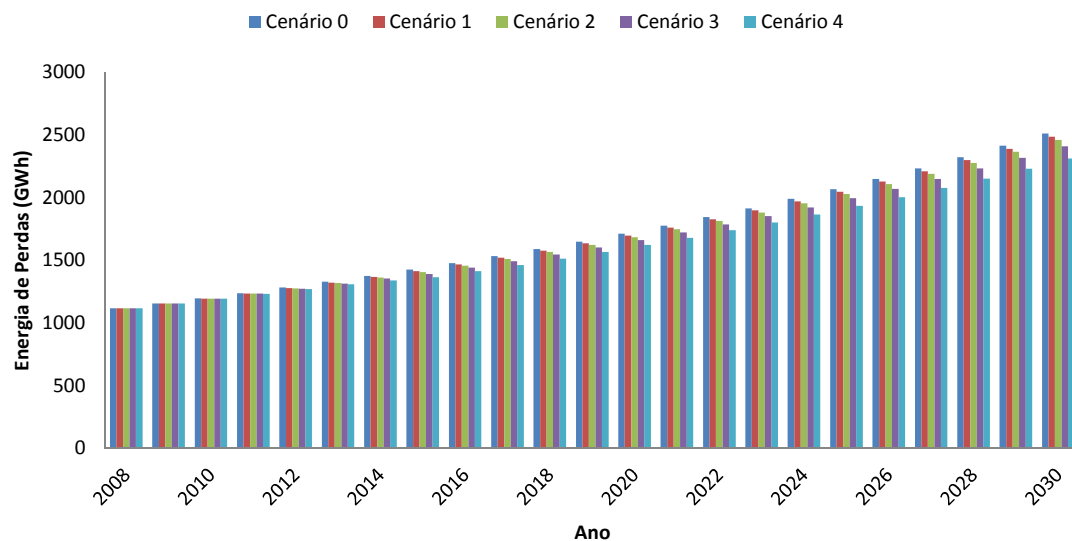
- Na figura seguinte é representada a evolução da potência instalada de μ G a nível nacional nos 5 cenários que foram considerados nos estudos efetuados



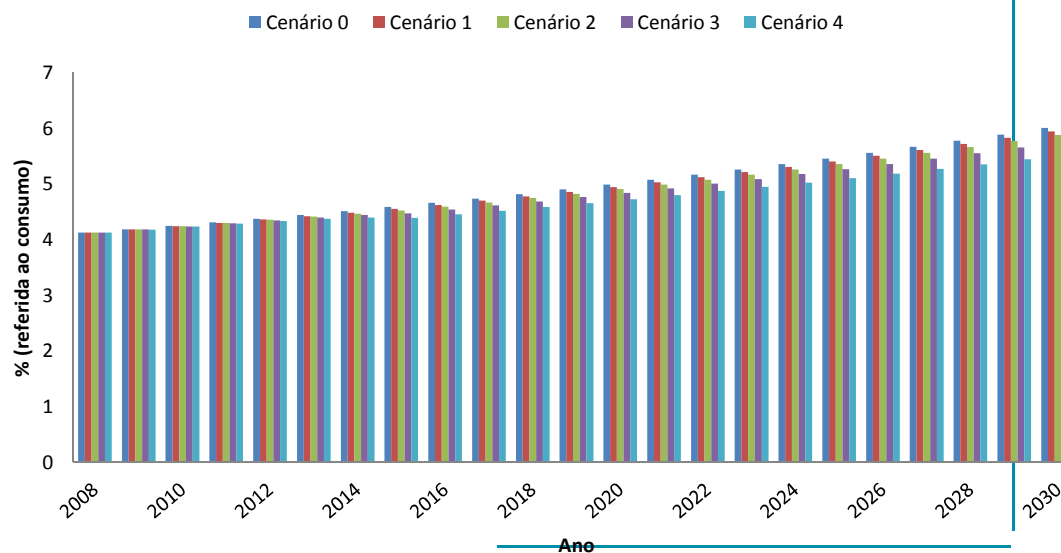
Cenários de evolução da potência instalada de μ G, no território nacional, entre 2008 – 2030

- Nos estudos efetuados, foi considerado que as unidades de μ G são operadas com $\text{tg}\phi=0$
- Admitiu-se que 80% de toda a μ G existente seria do tipo fotovoltaico, enquanto os restantes 20% foram atribuídos às tecnologias do tipo micro-eólico

Resultados de BT – Energia de Perdas

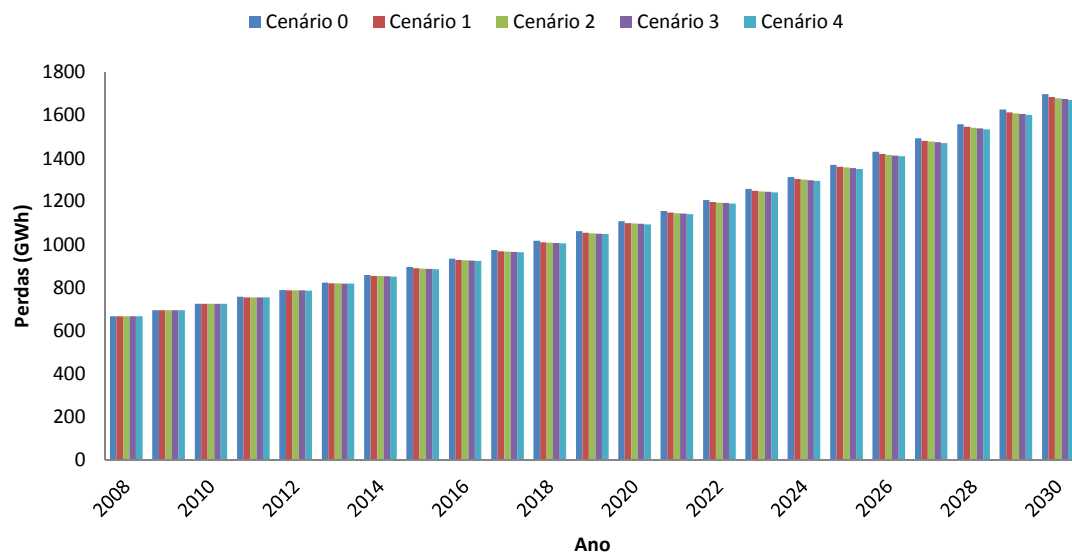


Evolução do valor anual da energia de perdas na rede BT nacional

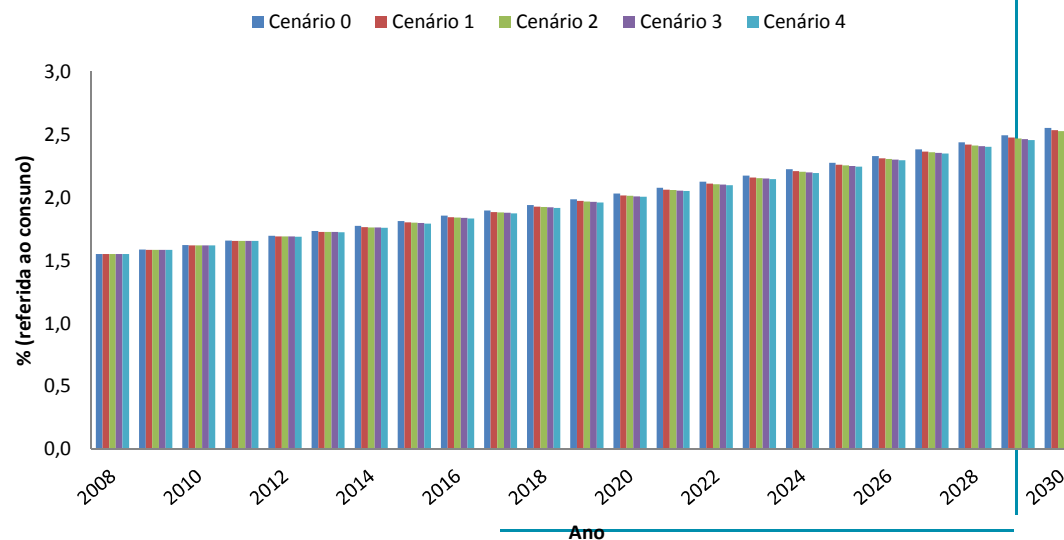


Evolução da percentagem do valor anual da energia de perdas da rede BT nacional (referida ao consumo)

Resultados de MT – Energia de Perdas

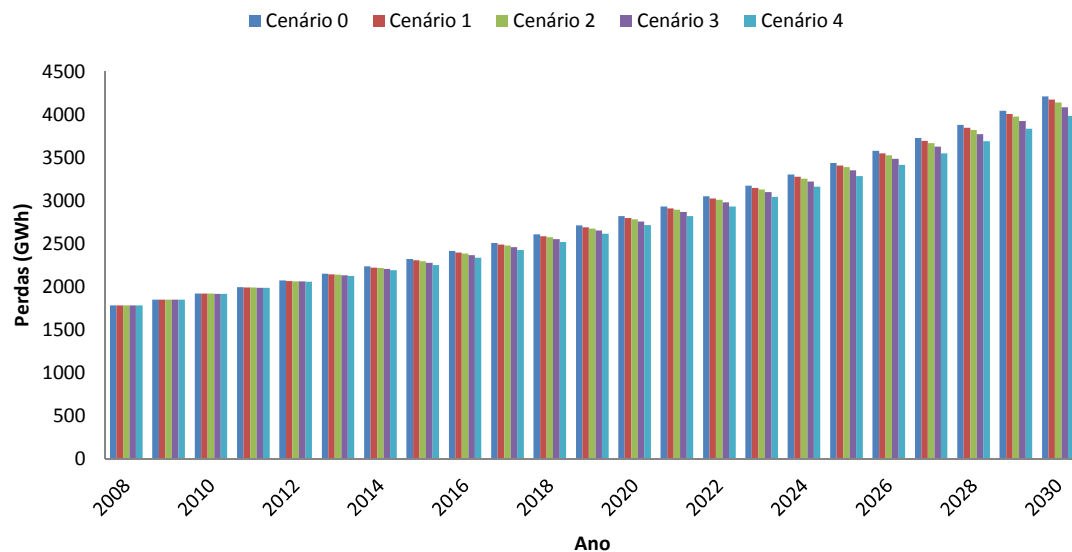


Evolução do valor anual da energia de perdas na totalidade da rede MT nacional

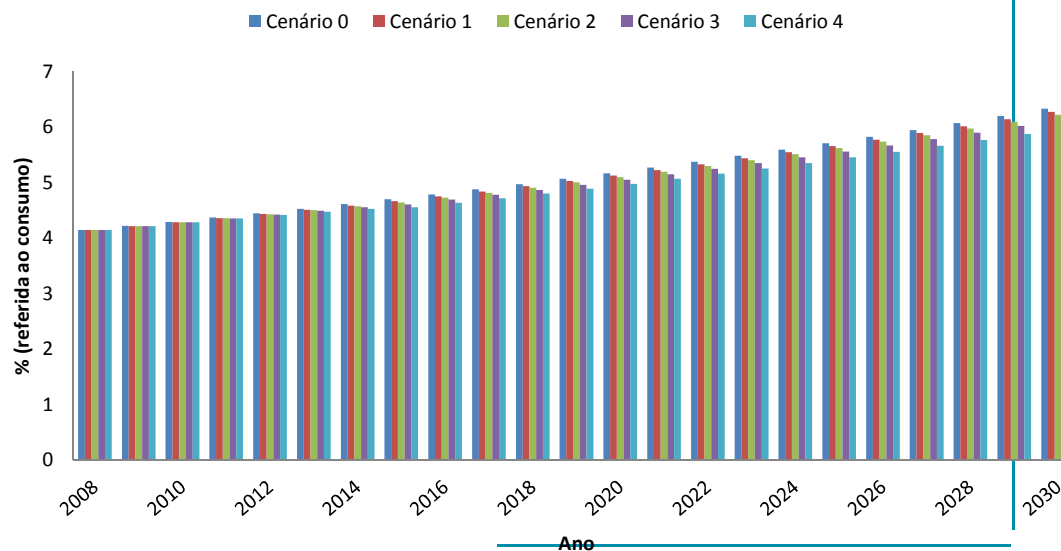


Evolução da percentagem do valor anual da energia de perdas da rede MT nacional (referida ao consumo)

Resultados Rede Nacional – Energia de Perdas

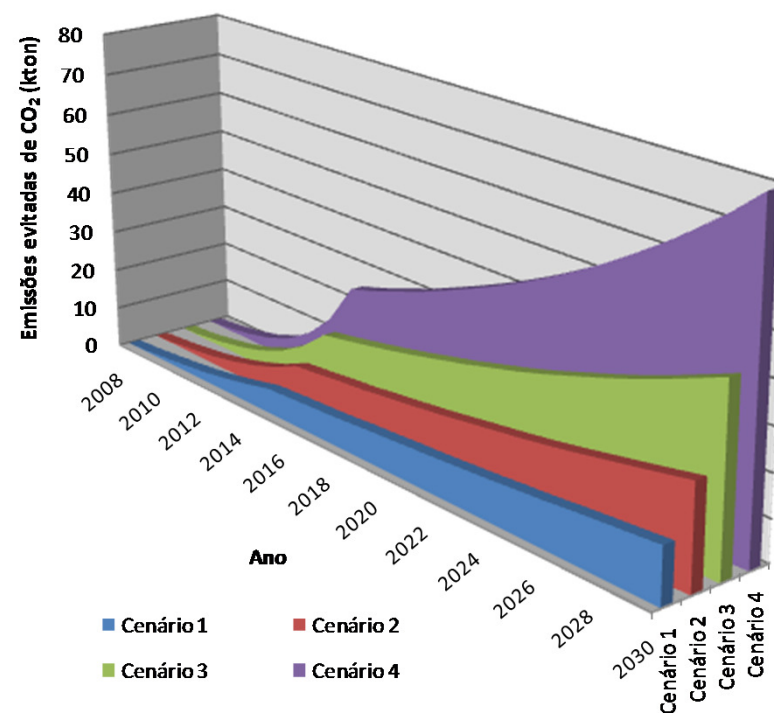


Evolução do valor anual da energia de perdas nas redes BT+MT a nível nacional



Evolução da percentagem do valor anual da energia de perdas da rede BT+MT a nível nacional (referida ao consumo)

Resultados Rede Nacional – Emissões de CO₂



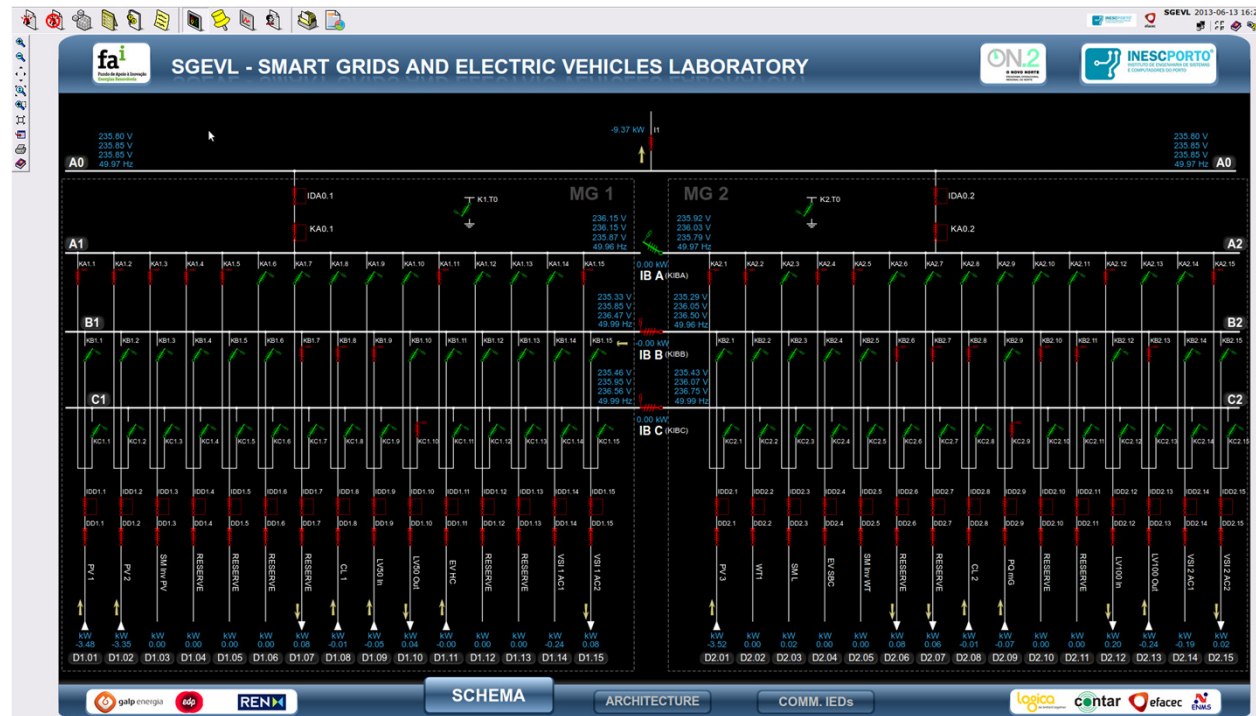
Emissões de CO₂ evitadas em todas as redes BT e MT nacionais (em relação ao cenário base)

Controlo Coordenado de Tensão

- Tendo em conta os novos desafios que a PD traz ao sistema de distribuição, sobretudo ao nível dos perfis de tensão, duas estratégias de controlo são possíveis:
 - **Controlo Local** – pretende garantir o controlo dos perfis de tensão das redes de BT recorrendo apenas a informação que é recolhida no próprio nó de instalação de cada unidade de micro-geração
 - **Controlo Coordenado** – assenta num esquema de controlo simultaneamente descentralizado e hierárquico, que explore a arquitetura de comunicações (e consequentemente, as possibilidades de controlo) disponível para o smart-metering, tendo como objetivo abordar o problema ao nível da MT e da BT de forma a garantir uma operação coordenada de todos os dispositivos

Laboratório de redes inteligentes e veículos elétricos

Electric panel - Command and data acquisition infrastructure



- Six 400 V busbars and thirty feeders commanded through contactors.
- Busbars interconnecting switches.
- Feeders equipped with a metering equipment.
- SCADA system to support the laboratory operation and monitoring.

Laboratório de redes inteligentes e veículos elétricos

Electric infrastructure:

- Renewable based microgeneration
- Storage
- Resistive load banks
- LV cables emulators (50 A and 100 A)
- A plug-in electric vehicle
- Microgeneration and EV power electronic interfaces
- Electric panel, command and measuring equipment
- Communication solutions



15 kWp photovoltaic panels



25 kWh Flooded Lead-Acid (FLA)



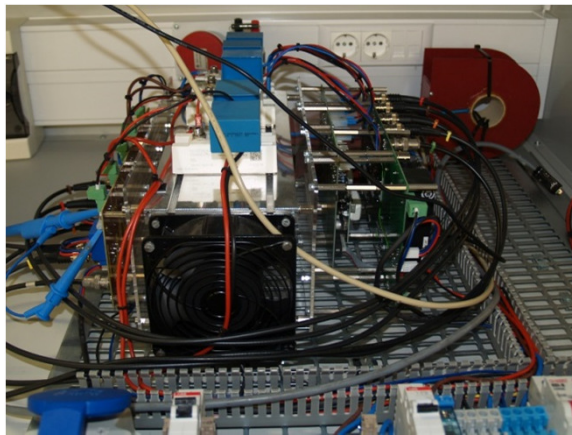
128 Lithium battery cells



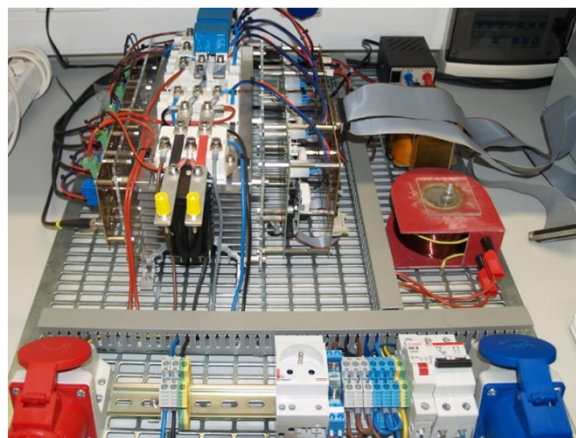
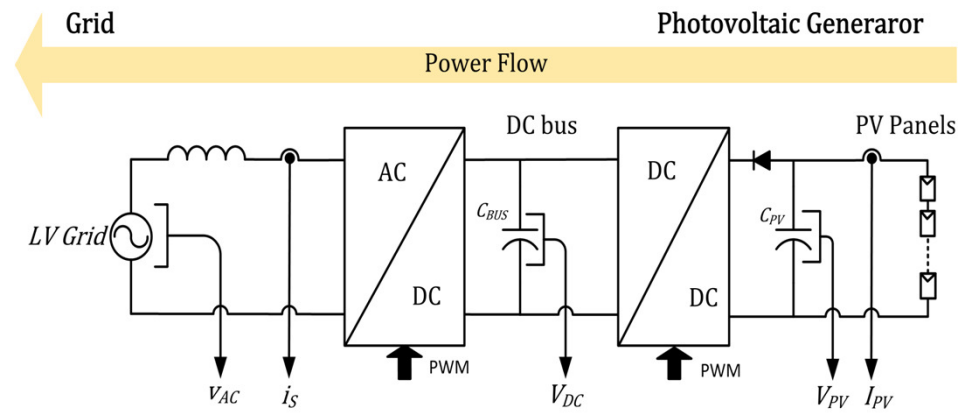
3kW wind micro-turbine emulator

Laboratório de redes inteligentes e veículos elétricos

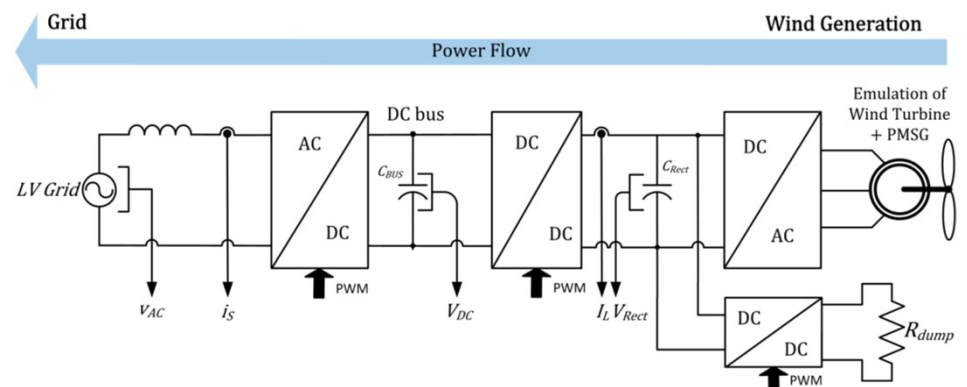
DC/AC microgeneration prototypes



Solar DC/AC inverter prototype

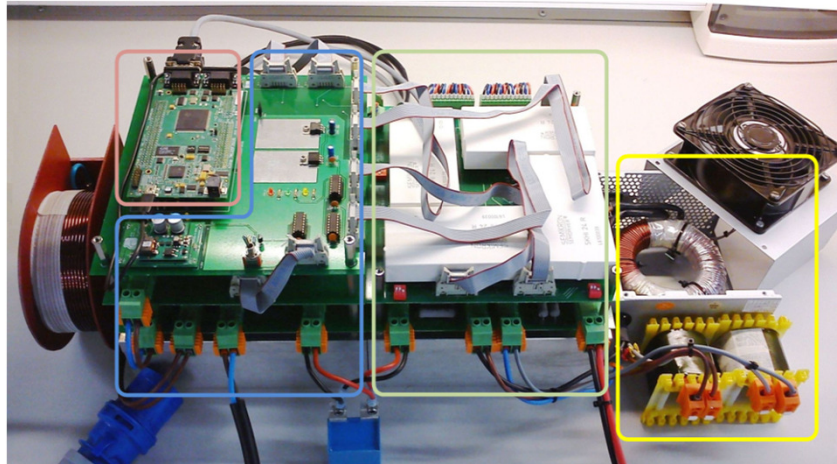
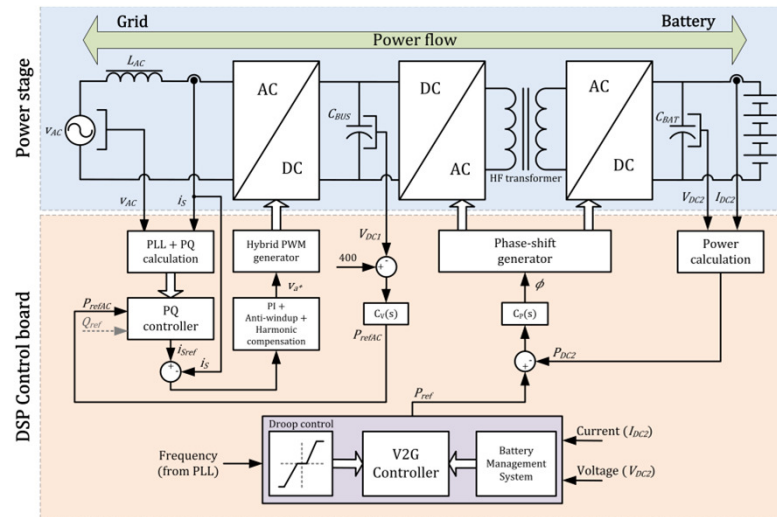


Wind DC/AC inverter prototype



Laboratório de redes inteligentes e veículos elétricos

Bidirectional EV charger prototype

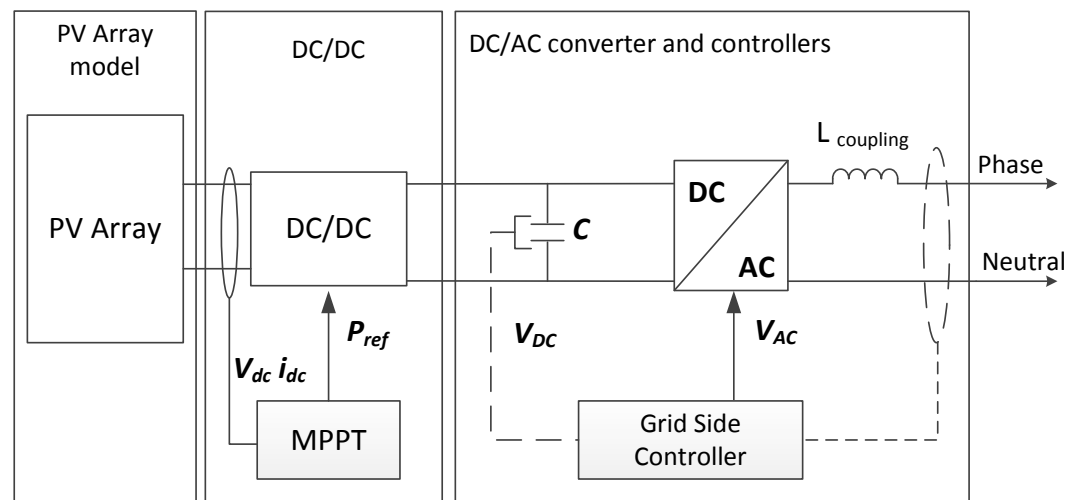


DSP Control Board Full-Bridge Inverter Dual Active Bridge HF Transformer

- A 3.6 kW single-phase bi-directional DC/AC inverter prototype is connected to the lithium battery bank.
- The charging rate can be controlled in order to provide grid supporting functionalities.
- Smart charging and V2G capabilities.
- Bi-directional communication with the MGCC.
- Possibility of remote control.

Inversor para microgeração solar

Princípio de funcionamento de uma unidade de microgeração solar



O conversor DC/DC é controlado através de algoritmos MPPT

Pesquisa do ponto de funcionamento de potência máxima de acordo com a radiação incidente e temperatura

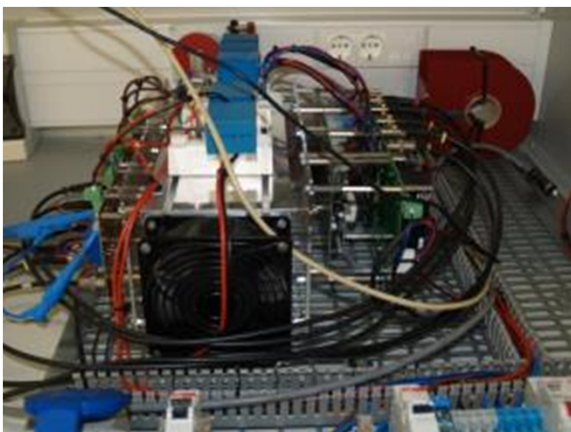
Regula a potência injetada na rede AC de forma a manter a tensão DC constante

Pode também incluir estratégias adicionais de suporte à operação da rede

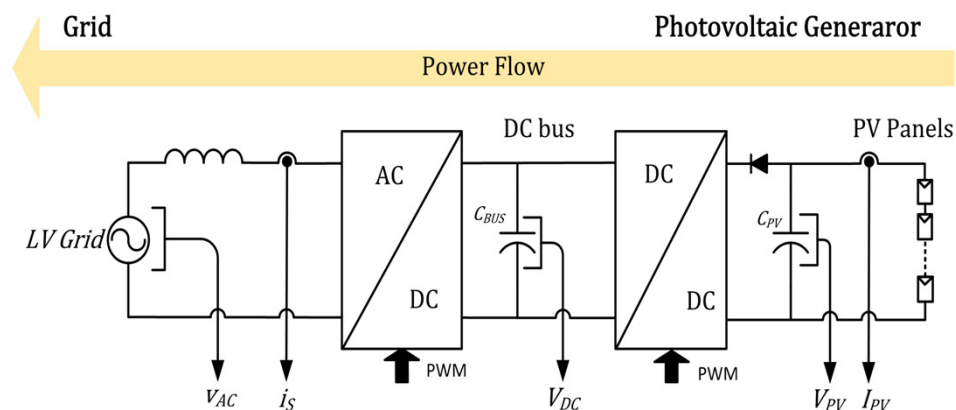
Inversor para microgeração solar

O protótipo desenvolvido inclui:

- cadeia de conversão de energia – (cadeia de conversão típica DC/AC com um andar intermédio DD/DC do tipo elevador)
- dispositivos eletrónicos dedicados à atuação dos semicondutores de potência e respetiva proteção eletrónica
- os transdutores de corrente e de tensão (CC e C.A.) e respetiva cadeia de condicionamento de sinal
- processador digital de sinais e circuitos associados.
- dispositivos de comunicação e interface com o operador
- **controlo do inversor** incluindo **estratégias avançadas de suporte à operação da rede BT**



Protótipo do inversor solar monofásico

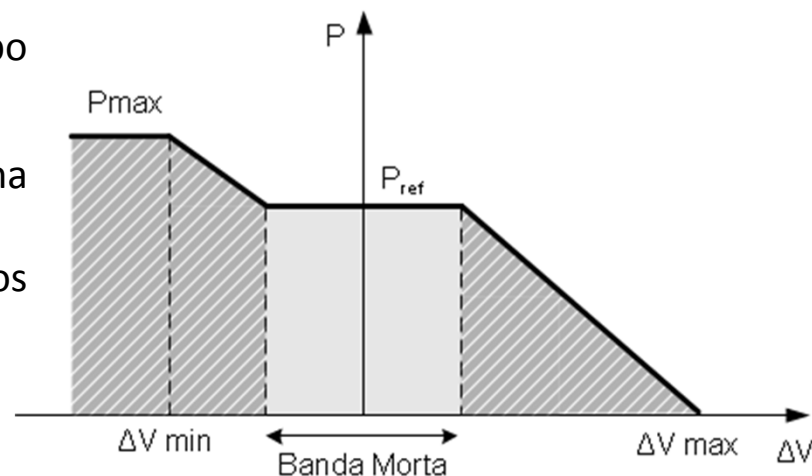


Arquitetura do inversor

Inversor para microgeração solar

Participação na regulação de tensão na rede BT

- A potência ativa injetada pelo protótipo solar é regulada localmente de forma a:
 - Suportar a regulação de tensão na rede BT
 - Evitar a saída intempestiva dos inversores por sobretensão.

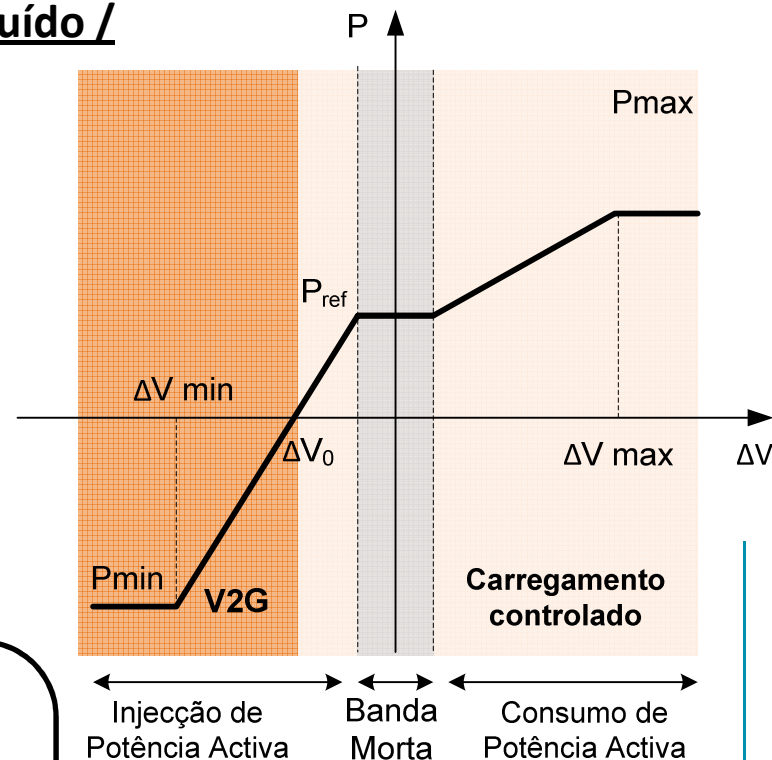
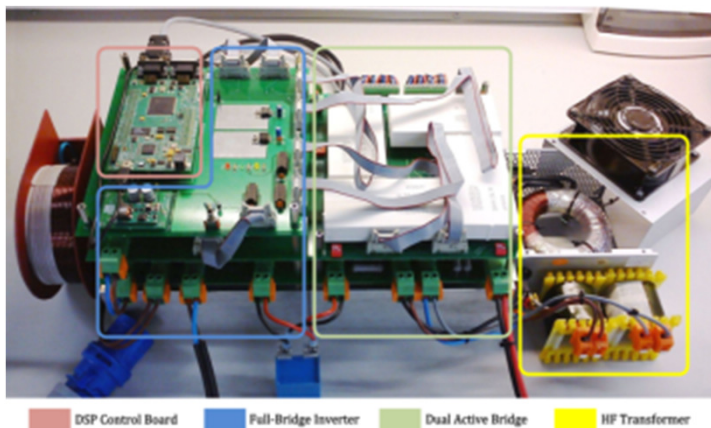


Regra de Controlo:

- Desvio de tensão **dentro** dos limites → Potência máxima injetada admissível - P_{ref}
- Desvio de tensão **ultrapassa** limite → Redução da potência máxima admissível máximo
- Desvio de tensão **abaixo** do limite → Aumento da potência máxima admissível mínimo

Inversor bidirecional para VE (ou baterias estacionárias)

Inversor bidirecional para armazenamento distribuído / Sistema carregamento de Veículos Elétricos

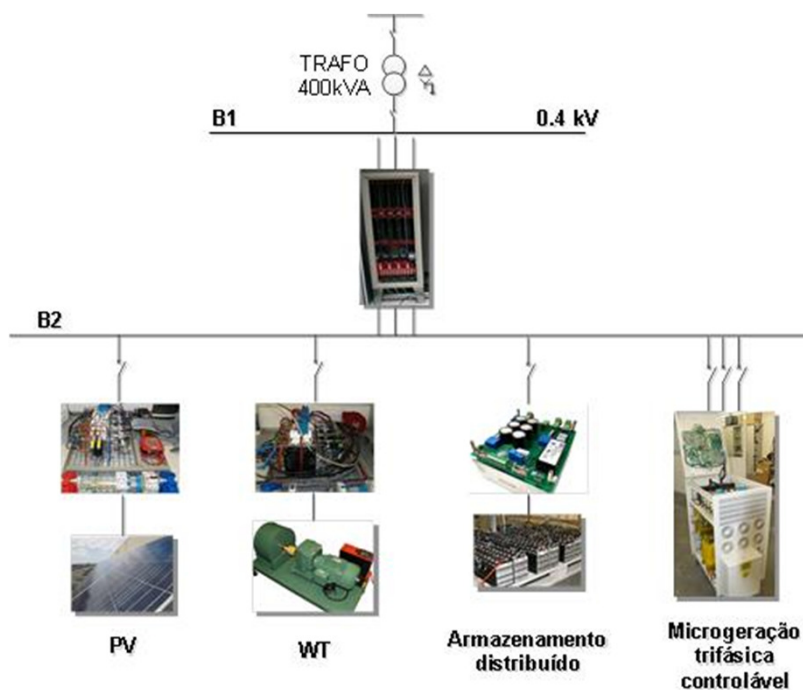


- Protótipo inversor DC/AC bidirecional para soluções de armazenamento distribuído
- Permite controlar a potência de referência de acordo com a tensão da rede
- Emula o funcionamento do sistema de carregamento de um Veículo Elétrico
- Capacidade de comunicação bidirecional
- Controlo remoto

Coordenação autónoma com os inversores solares tendo em conta a tensão da rede

Testes

Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão



Sistema de teste

- Duas unidades monofásicas de microgeração com capacidade de regulação em tensão – solar e emulador eólico
- Unidade monofásica de armazenamento distribuído
- Inversor trifásico com potência controlável.
- As unidades monofásicas estão ligadas à fase A do sistema de teste

Objetivos:

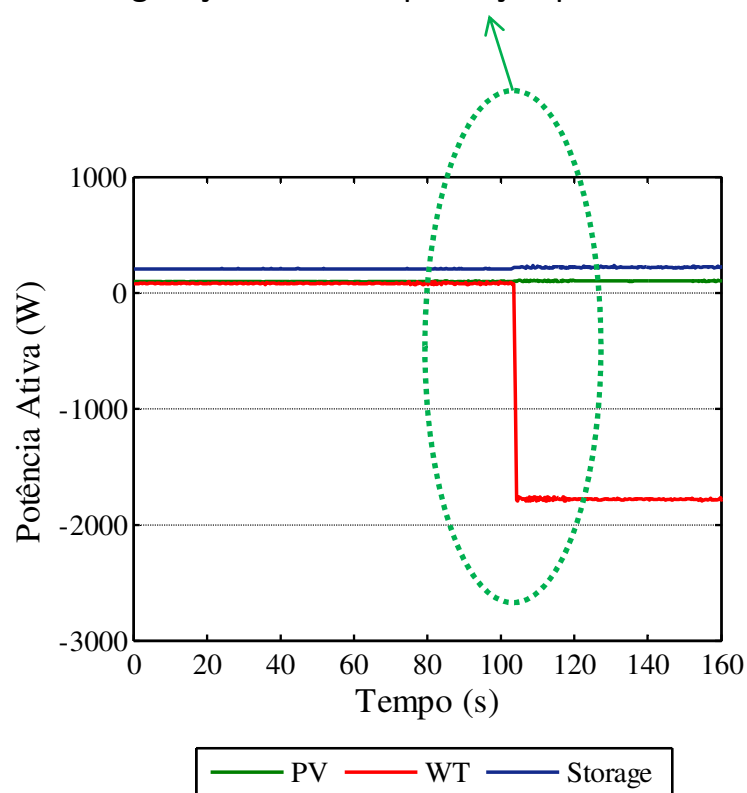
- Demonstrar o conceito de regulação tensão local
- Demonstrar a cooperação entre inversores durante a perturbação

Testes

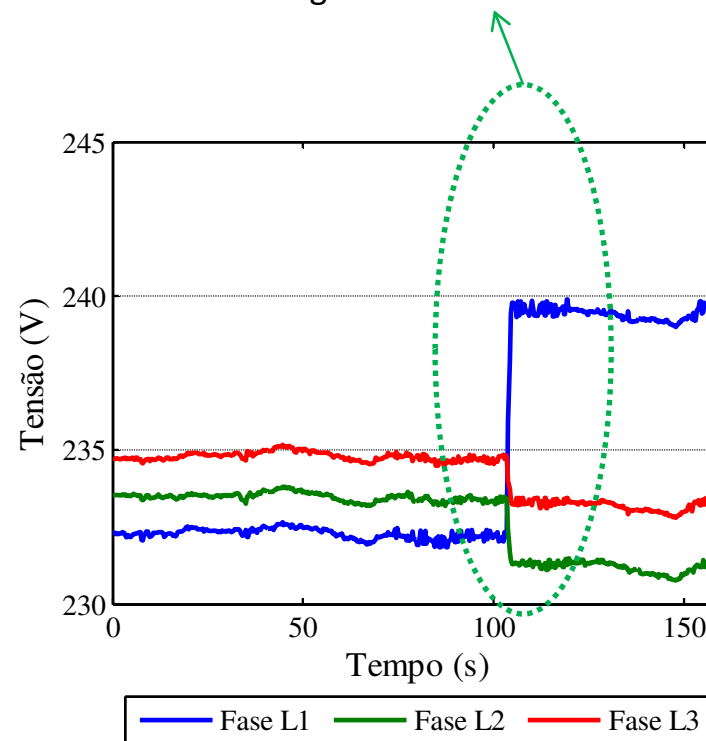
Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 1 - aumento da produção na unidade de microgeração eólica

Microgeração aumenta produção para 2 kW



Resulta um aumento de 5 V na fase A, onde a unidade está ligada

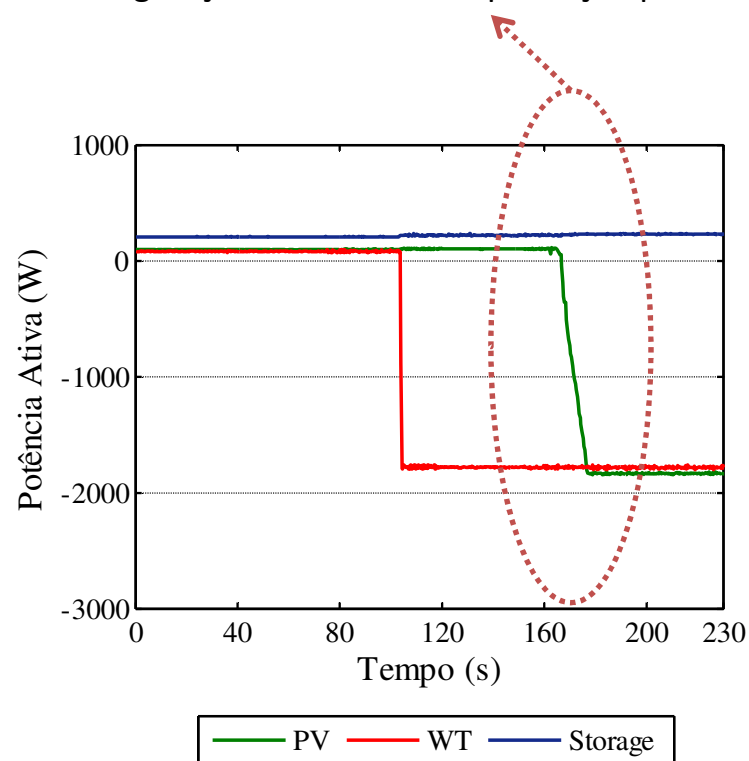


Testes

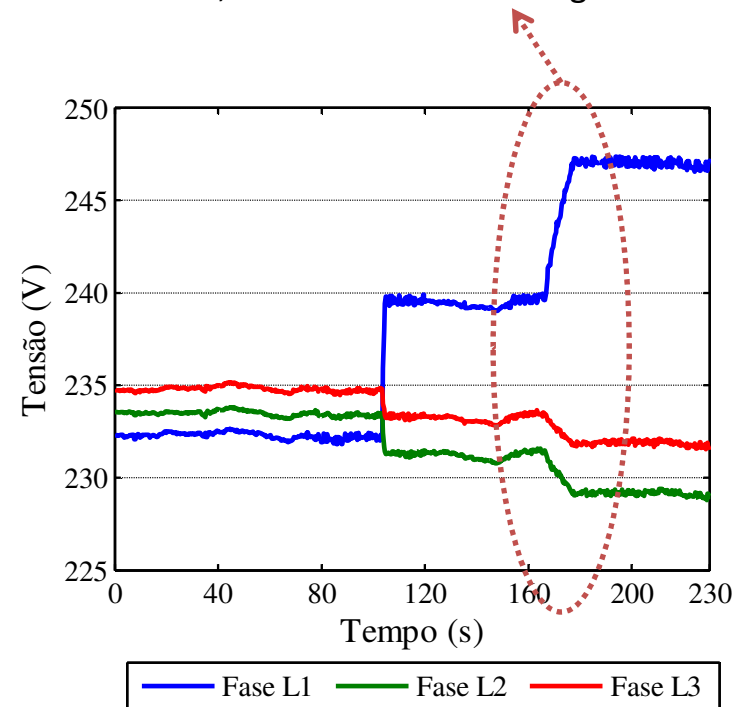
Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 2 - aumento da produção na unidade de microgeração solar

Microgeração solar aumenta produção para 2 kW



Novo aumento da tensão de 240 para 247 V na fase A, onde a unidade está ligada

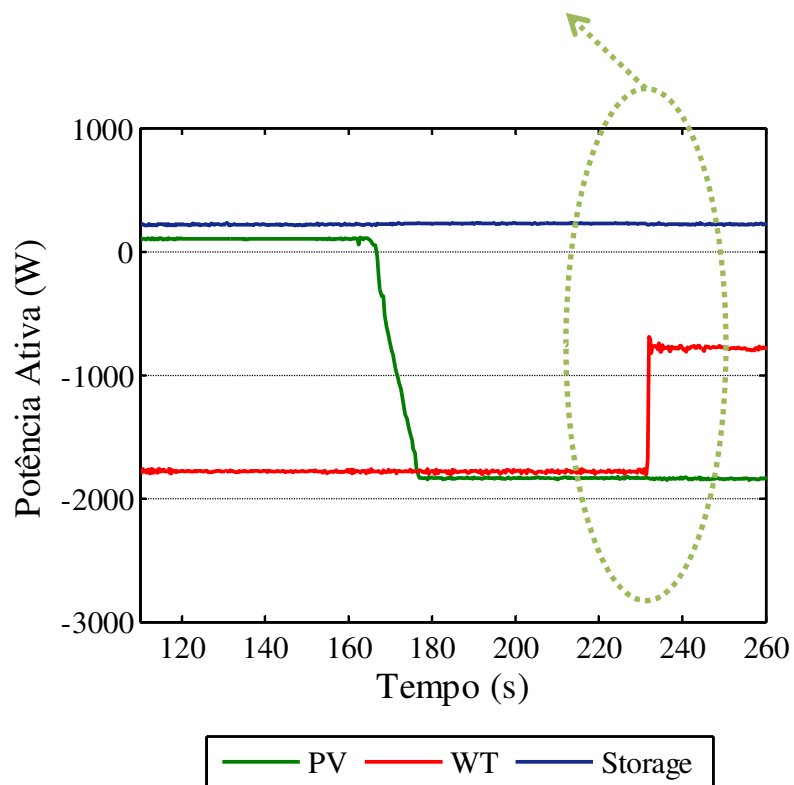


Testes

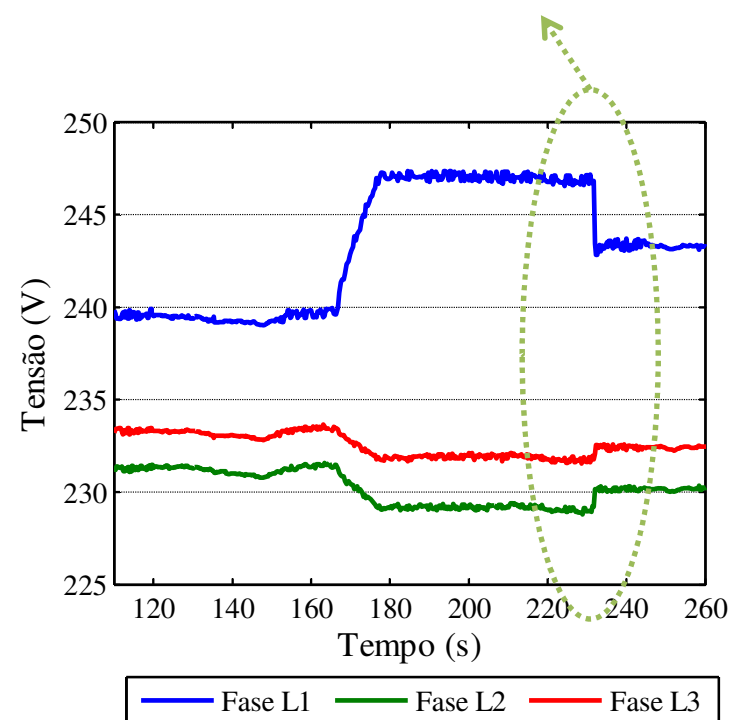
Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 3 - ativada a estratégia de controlo de tensão P-V da microgeração eólico

Redução imediata da potência injetada pela microgeração eólica em resposta à tensão



A redução de potência produz uma redução da tensão para 243 V

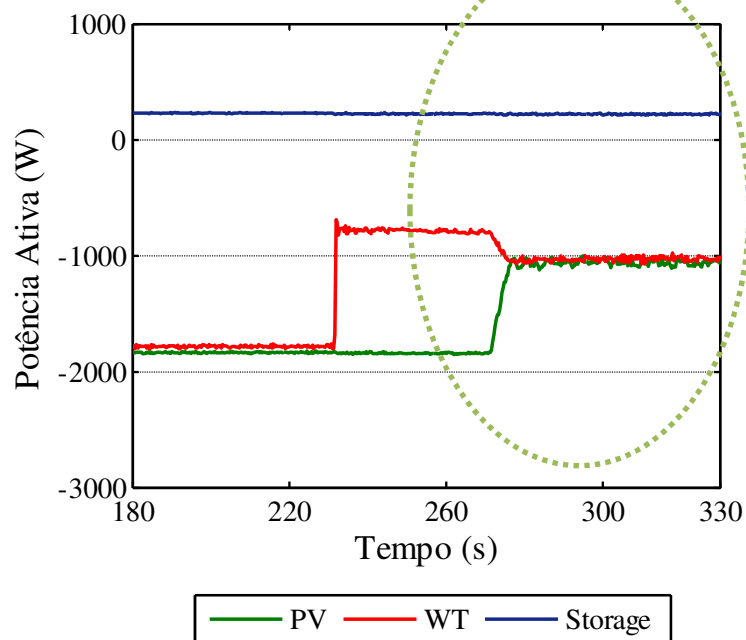


Testes

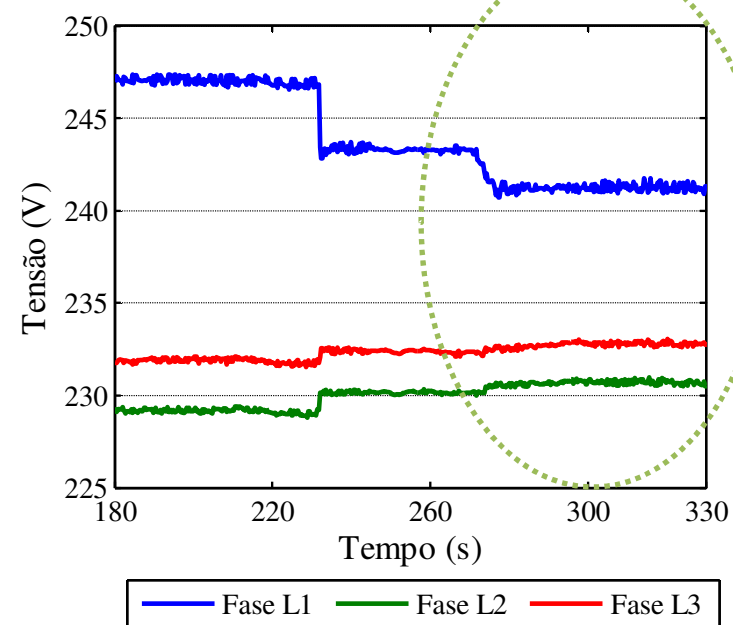
Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 4 - Ativada a estratégia de controlo de tensão P-V da microgeração solar

Verifica-se a participação coordenada do microgerador eólico e solar, com base apenas na medida local de tensão



A participação adicional da microgeração solar permite uma nova redução da tensão para 241 V

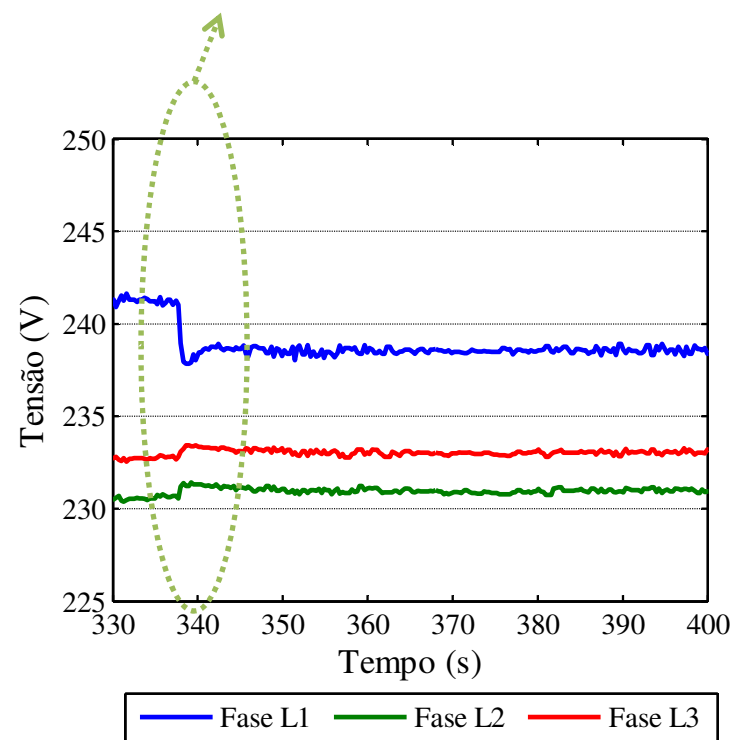
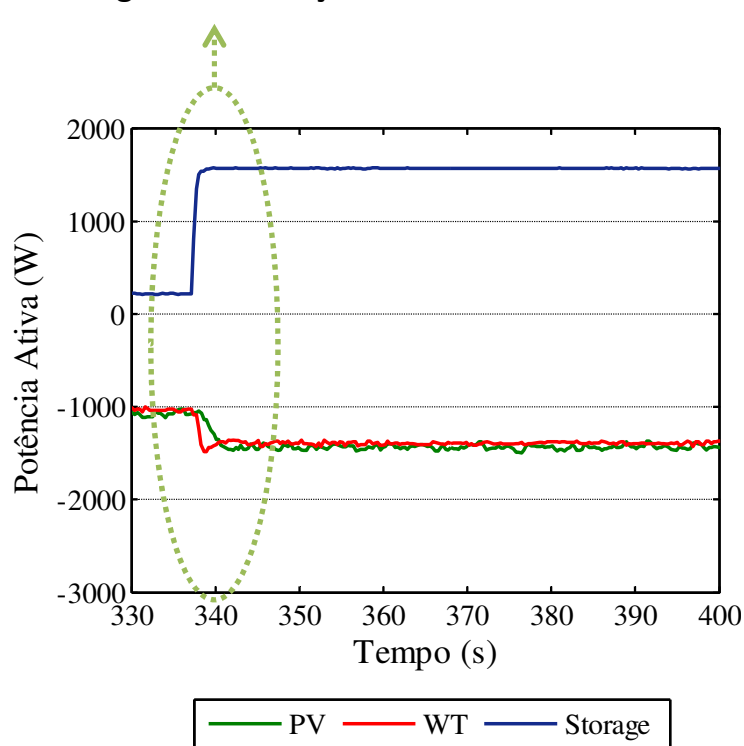


Testes

Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 5 – Início do período de carregamento do inversor bidirecional do armazenamento distribuído

O aumento de carga do sistema permite um ligeiro aumento da produção dos microgeradores, devido à ligeira diminuição da tensão

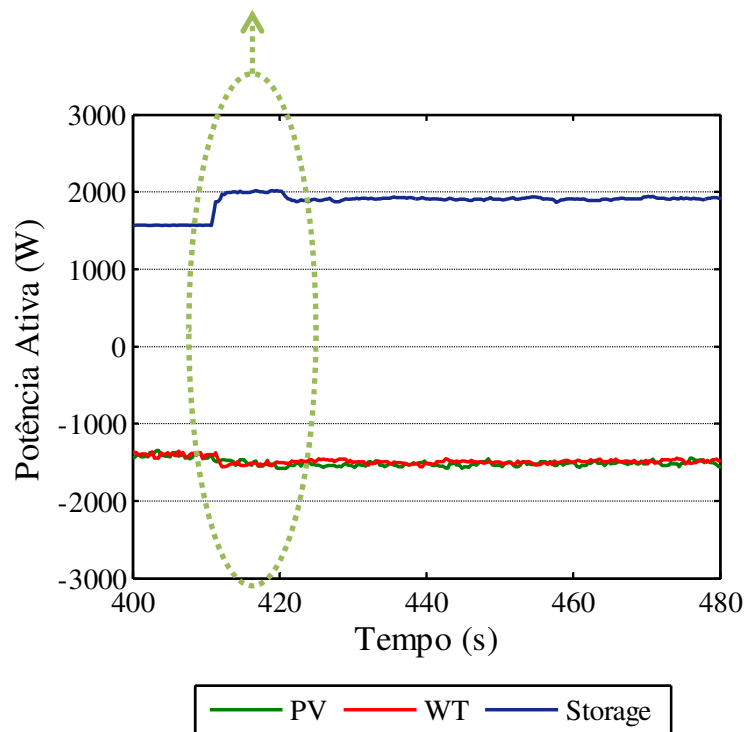


Testes

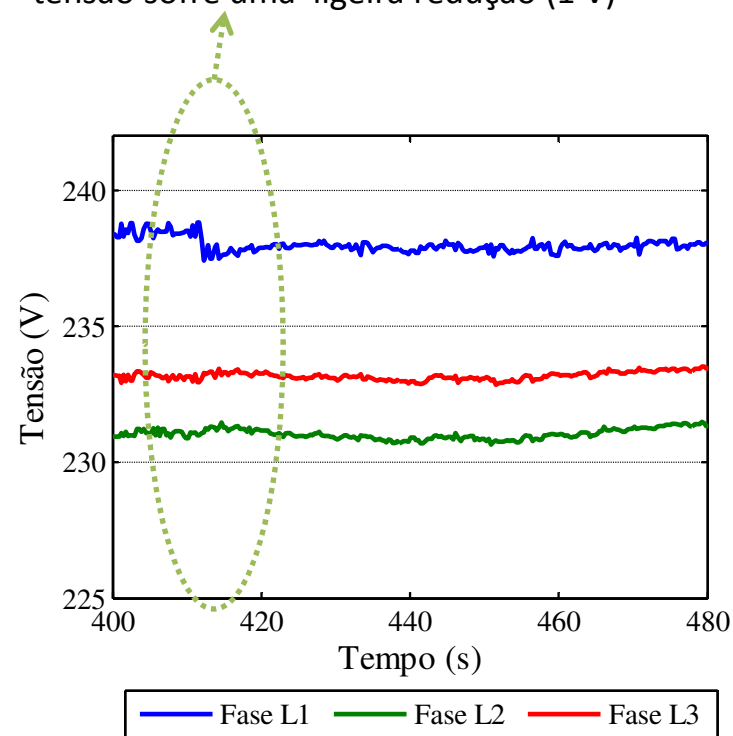
Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 6 – Ativada a estratégia de controlo de tensão P-V do inversor bidirecional do armazenamento distribuído

Ao ativar o controlo de tensão o inversor aumenta a taxa de carregamento



Devido ao aumento da carga no sistema a tensão sofre uma ligeira redução (1 V)

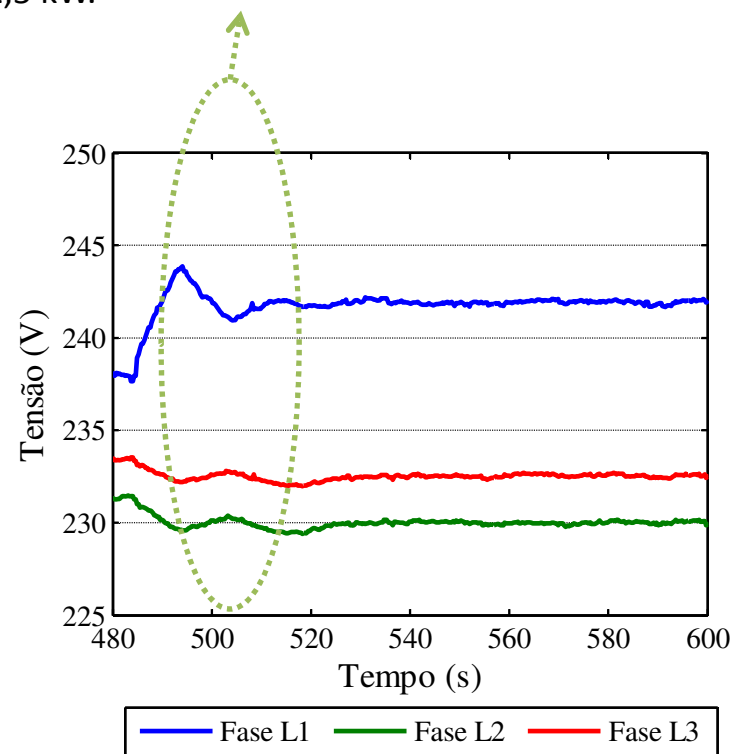
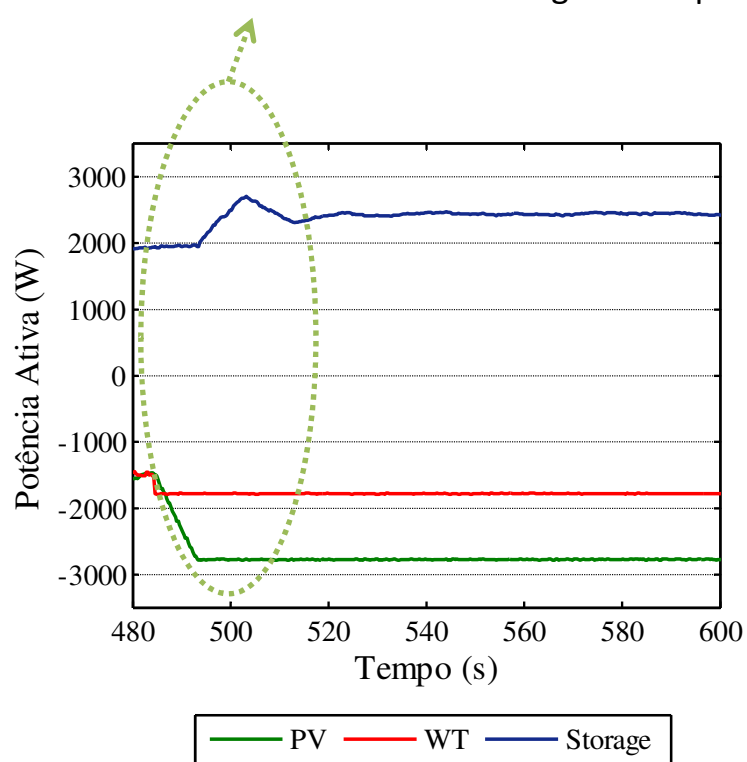


Testes

Teste experimental – Funcionalidades de suporte de tensão

Etapa 7 – Aumento da produção solar (Regulação tensão dos inversores microgeração desativada)

O novo aumento de produção solar causa um aumento de tensão na fase A. O carregador bidirecional aumenta a taxa de carregamento para 2,5 kW.



A Visão Futurista das Redes Elétricas Inteligentes



Recursos Energéticos Distribuídos

- Dispositivos de armazenamento distribuído (estático: baterias...)

- Propriedade do Operador do Sistema de Distribuição (?)



- Unidades de Produção Distribuída (eólica, solar, cogeração...)

- Propriedade de promotores privados



- Cargas controláveis (grandes consumidores industriais e... conjunto de consumidores domésticos)



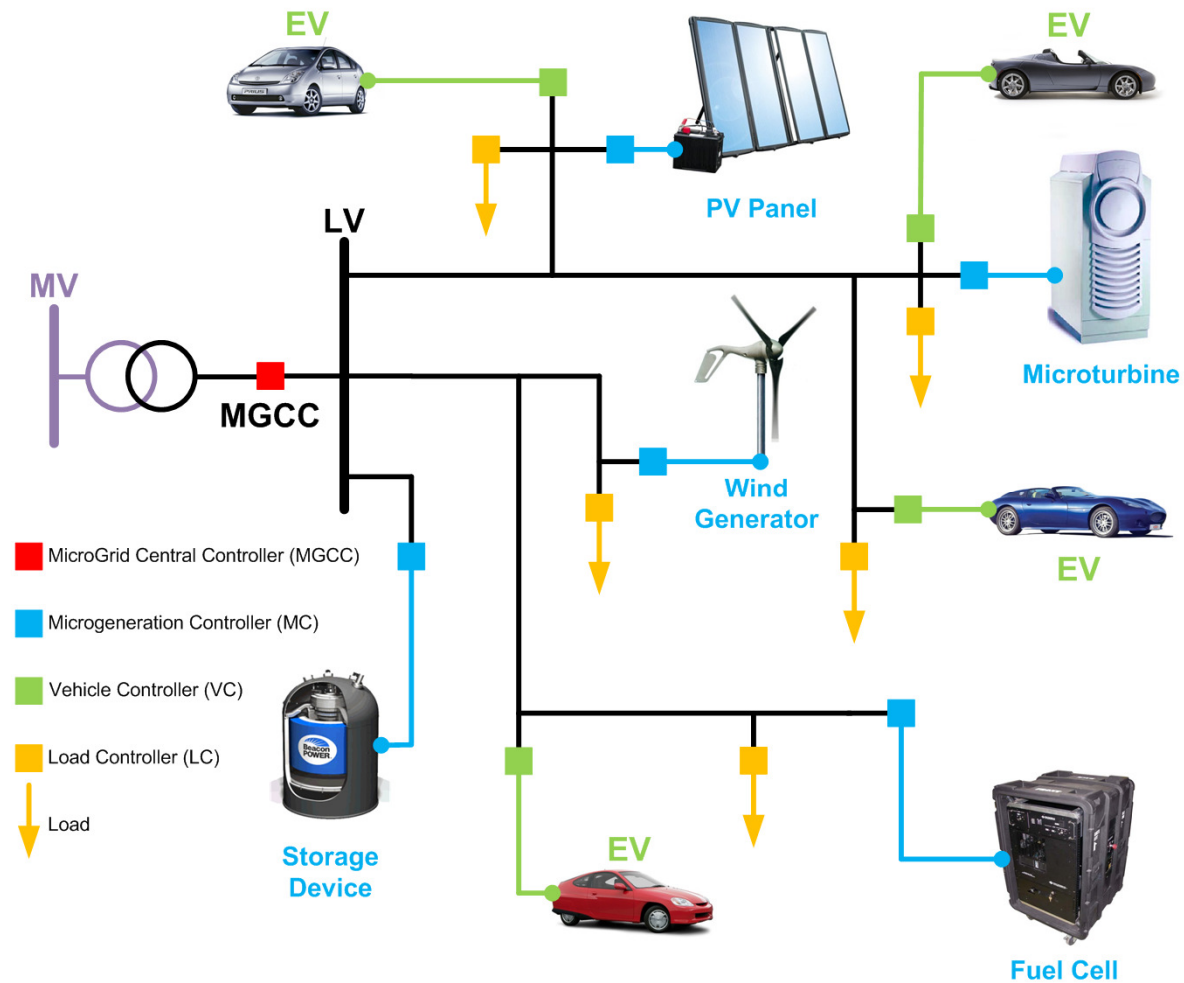
- Veículos Elétricos (cargas controláveis altamente flexíveis e futuramente dispositivos de armazenamento distribuído em modo V2G)



Gestão Flexível e Integrada dos Recursos Distribuídos



Microredes / Redes Inteligentes



Arquiteturas para redes inteligentes

- Development of new control and management architectures

SCADA/DMS – Supervisory Control and Data Acquisition / Distribution Management System

SSC – Smart Substation Controller

DTC – Distribution Transformer Controller

EB – Smart Meter

DG – Distributed Generation

CL – Controllable Load

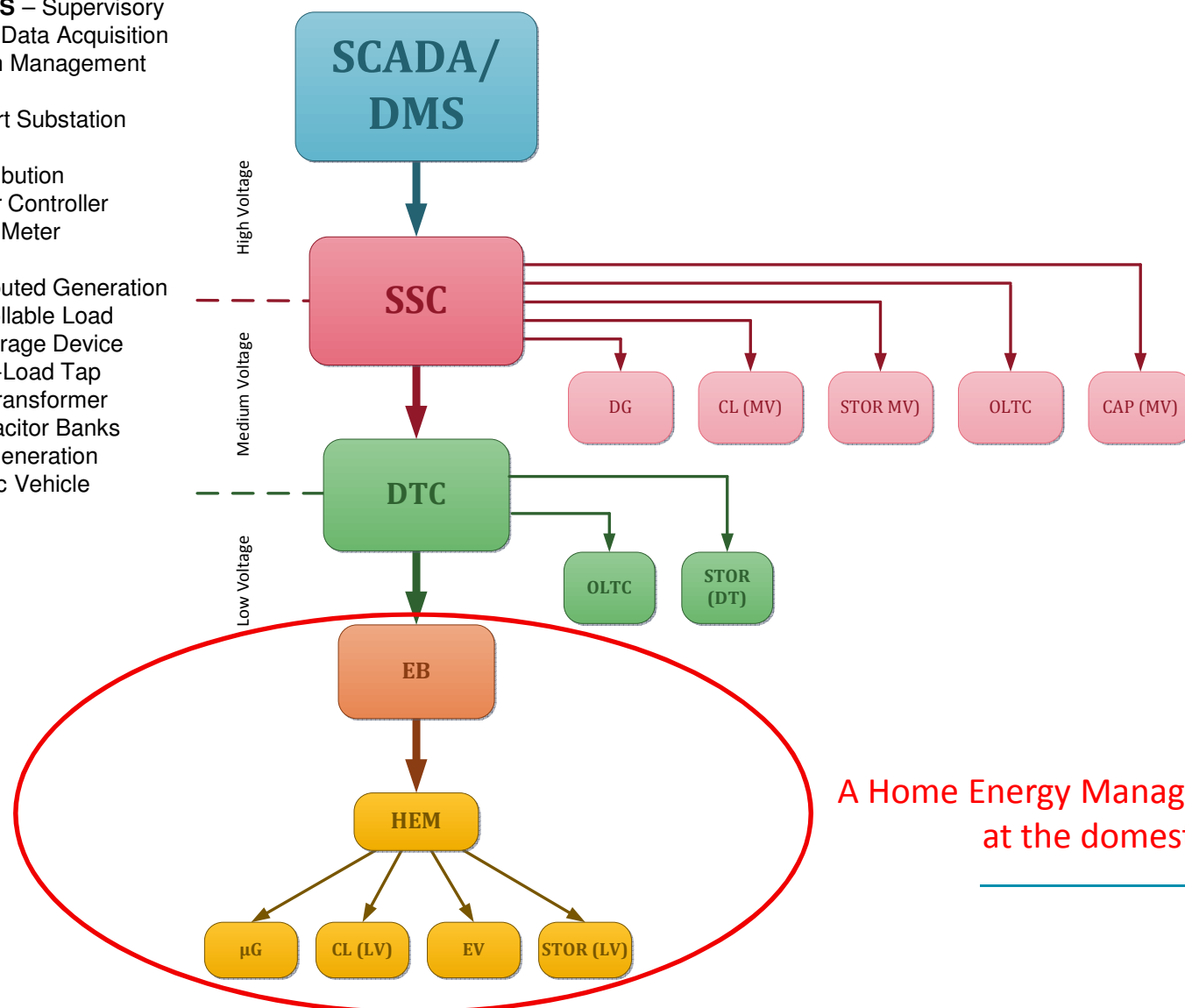
STOR – Storage Device

OLTC – On-Load Tap Changing Transformer

CAP – Capacitor Banks

μG – Microgeneration

EV – Electric Vehicle



A Home Energy Manager to control DER at the domestic level

Funcionalidades Avançadas

- Ferramentas de **previsão de carga** ao nível da MT
 - Agregando informação da rede de BT através dos DTC
- Ferramentas de **previsão de produção** de origem renovável
 - Com base em previsão local de geração eólica e solar fotovoltaica
- **Monitorização avançada** da rede local de distribuição e **estimação de estado** ao nível da MT
 - Identificação da topologia e estimação de estado da rede de MT com base na informação proveniente dos *smart meters*

Funcionalidades Avançadas

- **Controlo avançado de tensão** ao nível da MT
 - Com base nos diversos recursos energéticos distribuídos existentes (geradores, cargas controláveis e dispositivos de armazenamento) → Necessidade de coordenação de ações!
- **Coordenação entre o Operador do Sistema de Distribuição (OSD) e o Operador do Sistema de Transporte (OST)**
 - Numa primeira fase: garantir que os problemas verificados ao nível da distribuição (congestionamentos nas linhas, perfis de tensão, inversão de fluxos) são resolvidos a esse nível e não são um fardo para o OST
 - Numa segunda fase: garantir o fornecimento de serviços de sistema por parte do OSD ao OST (por exemplo, reservas) de forma a resolver problemas na rede de transmissão (por exemplo, congestionamentos nas linhas)

Conclusões

- A produção distribuída associada à pequena produção renovável e ao autoconsumo terá tendência a aumentar
 - Benefícios para o ambiente e metas UE
 - Redução de perdas para penetrações moderadas
- Para penetrações elevadas, podem ocorrer problemas de tensão elevada nas redes BT e MT
- É possível aumentar a capacidade de receção das redes implementando controlo local da produção
 - Evitando cortes totais
- No ambiente de redes inteligentes é possível coordenar recursos energéticos distribuídos de forma a evitar problemas de tensão e congestionamentos quando a PD aumenta