

## **PROPOSTA DE CANDIDATURA**

**PLASMA2Gas**

### **PARTE B**

**(ANEXO TÉCNICO)**

**SISTEMA DE INCENTIVOS À INVESTIGAÇÃO E  
DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO (SI I&DT)**

**AVISO Nº 17/SI/2019**

**PROJETOS EM COPROMOÇÃO**

Maio.2020

### ***Acrónimo e Título do Projeto:***

**Plasma2Gas - Desenvolvimento de um sistema de gasificação por plasma a micro-ondas para a conversão termoquímica de lamas de depuração em gás de síntese**

### **Síntese (Português)**

O projeto Plasma2Gas visa o desenvolvimento de um sistema de gasificação de lamas de depuração por plasma através da indução de micro-ondas. O sistema ou solução Plasma2Gas incluirá uma unidade de alimentação de resíduos, uma unidade de gasificação por plasma induzido por micro-ondas, uma unidade de tratamento térmico do gás de síntese, uma unidade de limpeza do gás de síntese, uma unidade de armazenamento e consumo do gás de síntese e uma unidade de controlo e automação de todo o sistema. Pretende-se utilizar como matérias-primas para a alimentação do sistema proposto, resíduos de lamas de depuração com origens e características físico-químicas distintas, como são o caso das lamas do tratamento de águas residuais domésticas (ETAR), lamas do tratamento da indústria do papel ou lamas de tratamento de outras unidades industriais. A solução Plasma2Gas assenta na reutilização do gás de síntese resultante da gasificação desses resíduos para produção de energia elétrica diminuindo o impacto ambiental deste processo e contribuindo para a eficiência e autonomia energética dos gestores de resíduos. Por sua vez, o gás de síntese em excesso poderá ser utilizado para gerar energia ou queimado controladamente. Todos os resultados serão utilizados para elaborar uma base de dados sobre a qual será validado e testado o modelo teórico inicial, em que se baseará o software de controlo dos equipamentos, e que permitirá adaptar esta tecnologia à realidade de cada cliente. O processo permitirá ainda a obtenção de um subproduto sólido que poderá ser incorporado em materiais de construção civil. O projeto Plasma2Gas contribuirá para a transição do modelo linear de produção de bens e serviços, para um modelo circular (Economia Circular), permitindo a valorização de resíduos como recursos endógenos, a redução da sua deposição em aterro e a produção de energia com baixa pegada de carbono. Assim sendo, é possível concluir que a solução Plasma2Gas está alinhado com as atuais políticas nacionais e europeias nas áreas das Energias Renováveis e da Gestão de Resíduos, e constituirá um instrumento de inovação e desenvolvimento nestes sectores.

### **Síntese (Inglês)**

Plasma2Gas project aims to develop a gasification system for plasma purification sludge through microwave induction. The Plasma2Gas system or solution will include a waste feeding unit, a microwave-induced plasma gasification unit, a syngas heat treatment unit, a syngas cleaning unit, a storage unit and consumption of syngas and a control and automation unit for the entire system. It is intended to use as raw materials for feeding sewage sludge with distinct physic-chemical origins and characteristics, such as sludge from domestic waste water treatment plants (WWTP), sludge from the

paper industry treatment, or sludge from other industrial units. The Plasma2Gas solution is based on the reuse of the syngas resulting from the gasification of these wastes for the production of electric energy, reducing the environmental impact of this process and contributing to the efficiency and energy autonomy of the waste managers. In turn, the excess syngas can be used to generate energy or burned in a controlled method. All results will be used to develop a database on which the initial theoretical model will be validated and tested, which will allow this technology to be adapted to the reality of each client. The process will also allow the obtaining of a solid by-product that can be incorporated into civil construction materials. The Plasma2Gas project will contribute to the transition from the linear model of production of goods and services, to a circular model (Circular Economy), allowing the recovery of waste as endogenous resources, the reduction of its landfill and the production of energy with a low footprint of carbon. Therefore, it is possible to conclude that the Plasma2Gas solution is in line with current national and European policies in the areas of Renewable Energy and Waste Management, and will be an instrument of innovation and development in these sectors.

<b>Entidade líder do projeto:</b>	<b>NEL – New Energy Level, Lda</b>
-----------------------------------	------------------------------------

<b>1 - Total de copromotores (2+3):</b>	4
<b>2 - Empresas</b>	2
<b>3 - Entidades Não Empresariais do Sistema de I&amp;I (ENESII)</b>	2
<b>4 - Parceiros:</b>	

<b>Data de início:</b>	01/09/2020
<b>Data de conclusão:</b>	31/03/2023
<b>Duração (meses):</b>	31

<b>Investimento Total:</b>	1 041 659,82 €
<b>Investimento Elegível:</b>	1 041 659,82 €

### Lista de copromotores

N.º	Designação Social da Entidade	Abreviatura	Tipo de Entidade	ENESII	Público/ Privado
1	Nel - New Energy Level, Lda	NEL	Empresa	Não	Privado
2	AMBITREVO - Soluções Agrícolas e Ambientais, Lda	AMBITREVO	Empresa	Não	Privado
3	CVR – Centro para a Valorização de Resíduos	CVR	Centro de I&D ou Departamento de Universidade ou Politécnico	Sim	Privado
4	Universidade do Minho	UM	Centro de I&D ou Departamento de Universidade ou Politécnico	Sim	Público

## Descrição do Projeto

### 1.1. Enquadramento

A sociedade atual encontra-se em constante mudança, o que promoveu nas últimas décadas uma alteração substancial dos padrões de vida e dos paradigmas socioeconómicos e demográficos com os consequentes, e graves, impactes ambientais.

Estas mudanças, em boa parte promovidas pelo aumento da população, da industrialização e do consumismo global, expressado não só pela quantidade de produtos que existem no mercado, mas também pela diversificação de matérias-primas utilizadas, provocou nas últimas décadas um aumento exponencial dos resíduos produzidos. Além de constituírem um desperdício de recursos, os resíduos, caso não tenham uma gestão adequada, podem também provocar a poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas. Portanto, a gestão adequada dos resíduos é atualmente um dos grandes desafios com que se debatem as sociedades modernas.

A política de resíduos da UE tem evoluído ao longo dos últimos 30 anos através de uma série de planos de ação ambientais e através da criação de um quadro de legislação que visa reduzir os impactos ambientais e de saúde negativos e criar uma economia de energia e utilização eficiente dos recursos. Por exemplo, o Sexto Programa de Ação Ambiental da UE (2002-2012) identificou a prevenção e gestão de resíduos como uma das quatro principais prioridades. A estratégia temática de 2005 sobre Prevenção e Reciclagem de Resíduos resultou na revisão da Diretiva-Quadro que conduz a uma nova abordagem à gestão de resíduos, marcando uma mudança de paradigma: em vez de se abordar os resíduos como um fardo indesejável estes deverão ser encarados como um recurso valioso. A diretiva introduziu uma hierarquia de gestão de resíduos em cinco etapas onde a prevenção é a melhor opção, seguida de reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação, com a deposição em aterros como o último recurso [1].

Em Portugal, no que concerne à gestão de resíduos foram delineados vários planos estratégicos para distintas tipologias de resíduos, dos quais se destacam o Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020 (PNGR). É de salientar que um dos objetivos estratégicos da política de tratamento de resíduos definidos para o período 2014-2020 em Portugal visa "Prevenir ou reduzir os impactos adversos decorrentes da produção e gestão de resíduos, através do aumento de eficiência dos processos e tecnologias envolvidas na gestão de resíduos, numa lógica de ciclo de vida, evitando-se a transferência de impactos entre fases do ciclo de vida dos produtos/materiais, nomeadamente através da adoção de critérios que conjuguem a exequibilidade técnica e a viabilidade económica com a proteção da saúde e do ambiente" [2]. Verifica-se assim, que o Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020 (PNGR) em vigor estabelece como objetivo estratégico a promoção da eficiência da utilização de recursos naturais na economia favorecendo a prevenção da produção de resíduos, a utilização eficiente de bens e materiais e a sua reutilização ou reciclagem em fim de vida. No entanto, uma fração importante dos resíduos efetivamente produzidos não pode ser reciclada pelo que se definem no PNGR, outros tipos de valorização alternativos, que são considerados prioritários sobre a eliminação do resíduo por deposição em aterro (princípio da hierarquia dos resíduos) e que incluem os processos de valorização energética. Para reduzir a fração de resíduos ainda hoje colocados em aterro, o PNGR estabelece diversos objetivos operacionais entre os quais o de promover o fecho dos ciclos dos materiais e o

aproveitamento da energia em cascata, através da procura de materiais passíveis de valorização e da implementação de planos de racionalização de materiais e energia [3].

Em consonância com as premissas e objetivos preconizados no PNGR o novo Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal pretende igualmente tratar os resíduos como matéria-prima e não como desperdício. A economia circular, é um conceito estratégico que assenta na prevenção, redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Substituindo o conceito de «fim-de-vida» da economia linear por novos fluxos circulares de reutilização, restauração e renovação, num processo integrado, a economia circular é vista como um elemento-chave para promover a dissociação entre o crescimento económico e o aumento no consumo de recursos, relação tradicionalmente vista como inexorável. Relativamente à gestão de resíduos, este novo plano de ação indica claramente que a transformação dos resíduos em recursos é crucial para aumentar a eficiência dos recursos, de forma a fechar o ciclo numa economia circular. Assim, a promoção da inovação no domínio da reciclagem e reutilização, a limitação da deposição em aterros e incentivo à mudança de comportamento dos consumidores, contribuirá diretamente para a obtenção de benefícios significativos, ao nível do crescimento sustentável, criação de emprego, redução das emissões de gases com efeito de estufa, realização de economias diretas associadas a melhores práticas de gestão de resíduos e melhor ambiente [4].

Relativamente às lamas de depuração, a multiplicidade de origens (tratamento de águas residuais urbanas, de águas para abastecimento público, de efluentes líquidos das explorações pecuárias, de efluentes das indústrias agroalimentares, de efluentes de outras indústrias, etc.) induzem um carácter urgente no que concerne à sua gestão e valorização [8].

De acordo com o Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal (2017), são produzidas anualmente mais de 360 mil toneladas de lamas de depuração [9]. Em termos percentuais, de acordo com o INSAAR (Inventário Nacional de Abastecimento de Água e Águas Residuais) e ERSAR (Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos) são produzidas cerca de 65% de lamas provenientes de ETAR urbanas (LER 190805), 25% de pasta e papel (LER 030311) e 10% de outras indústrias [10]. No entanto, de acordo com os mesmos organismos, apenas 50% são valorizadas diretamente em solos agrícolas, sendo os restantes destinos finais divididos entre compostagem e aterro [11].

Numa trajetória convergente com esta problemática, encontra-se a questão energética. As relações existentes entre o ambiente e o setor energético são particularmente relevantes. A produção e o consumo de energia são responsáveis, direta e indiretamente, por alguns dos principais impactes negativos da atividade humana sobre o ambiente. Entre estes sobressaem os problemas associados às emissões para a atmosfera de gases com efeito de estufa, bem como de outros poluentes, como o dióxido de carbono, o dióxido de enxofre e os óxidos de azoto. Apesar dos esforços realizados na exploração do grande potencial associado às energias renováveis, e das assinaláveis melhorias que daí decorreram, Portugal é ainda largamente dependente do exterior no respeitante à produção de energia. Sendo um país de escassos recursos energéticos de origem fóssil, a fatura decorrente da sua importação tem ainda um peso substancial, económica e ambientalmente, que importa reduzir cada vez mais.

Os transportes e a indústria são, juntamente com o setor electroprodutor, os sectores de atividade com maior peso no consumo final de energia, sendo por isso os maiores contribuintes para pressões ambientais como as alterações climáticas, na base do aquecimento global. Igualmente central para o

alívio das pressões ambientais, são as políticas e medidas destinadas a incrementar a eficiência energética, entendida como a otimização da utilização de energia; trata-se de obter, para um mesmo nível de desempenho ou conforto, um consumo inferior de energia. Medidas tendentes a garantir o mais elevado nível de eficiência energética possível, devem estar presentes nas fases de produção, de transformação, de distribuição e de utilização da energia. O Pacote Energia-Clima (ou Pacote 20-20-20), adotado em dezembro de 2008 pela UE, estabeleceu para 2020 a redução de 20% do consumo de energia primária, relativamente aos níveis de 1990. Em outubro de 2014, no âmbito do quadro de ação da UE relativo ao Energia e Clima para 2030, foi estabelecida a meta não vinculativa de redução do consumo de energia de pelo menos 27% em relação às projeções do consumo futuro de energia com base nos critérios atuais. Em 2016, a análise do balanço energético nacional continua a evidenciar o peso das importações de energia (25,38 Mtep), apesar da diminuição de cerca de 4% face a 2015. Por outro lado, a produção doméstica apresentou um aumento de 12,7% face ao ano anterior, situando-se nos 5,90 Mtep. Da análise do consumo de energia primária por fonte energética resulta que, muito embora se mantenha a tendência de diminuição do seu peso relativo, o petróleo e derivados permanecem a fonte energética mais utilizada, representando 42,7% do consumo de energia primária em 2016. Como segunda fonte energética mais utilizada seguiu-se o gás natural, com 19,9%. Em terceiro lugar esteve o carvão com 13,1%, logo seguido da biomassa com 12,9% e da energia elétrica com 10,0%. A energia é vital em todas as economias. Com efeito, a energia é um input básico em praticamente todos os processos produtivos e uma rubrica importante no consumo final das famílias. Deste modo, características estruturais em termos de produção e consumo de energia, bem como choques nos preços ou quantidades, têm um forte impacto na maior parte das variáveis económicas. A literatura sobre o impacto da energia na atividade económica é extensa e tem ganho renovado interesse nos últimos anos devido à subida e elevada volatilidade dos seus preços.

A análise do impacto da energia nas economias envolve múltiplas dimensões inter-relacionadas, abrangendo desde questões microeconómicas ligadas à regulação até aos impactos macroeconómicos no PIB, inflação e balança corrente. Em termos macroeconómicos, o significativo peso da energia nos custos totais de produção e na despesa total das famílias fazem com que choques nos preços da energia induzidos pela oferta sejam importantes condicionantes das flutuações económicas. Inversamente, os desenvolvimentos na atividade económica internacional afetam potencialmente os preços da energia através da sua procura. Globalmente, os choques na energia afetam potencialmente os custos dos produtores, a inflação e o produto, bem como a competitividade externa e os termos de troca. O efeito dos choques na energia nas contas externas é naturalmente maior para países com maior dependência energética, i.e., aqueles onde a produção doméstica de energia primária cobre uma pequena parcela do consumo final. Nestes países o saldo da balança corrente é tipicamente afetado por movimentos nos preços internacionais da energia através de alterações nos termos de troca, embora em alguns casos um efeito positivo possa emergir por via de uma maior procura externa dos países exportadores de petróleo. Adicionalmente, uma elevada dependência energética expõe os países a episódios de corte no abastecimento de energia associados a instabilidade política ou militar, com efeitos muito perturbadores sobre a atividade económica. Finalmente, as preocupações ambientais aumentaram e as políticas dirigidas à redução das emissões tornaram-se importantes nos anos recentes, com consequências diretas na produção e no consumo de energia. Estes assuntos irão certamente moldar as políticas e o setor energético nas próximas décadas. Portugal é um país caracterizado por uma reduzida produção primária de energia, resultante da não existência de combustíveis fósseis e da não produção de energia nuclear. A

produção de energia primária está totalmente associada a energias renováveis. Esta situação estrutural dá origem a um elevado nível de dependência energética, aspeto também observado noutros países da UE15.

Avaliados estes cenários, quer da gestão de resíduos, quer da necessidade crescente energética do mundo moderno, uma solução que faça uma conversão destas duas problemáticas integradas terá obrigatoriamente um potencial enorme. Desta forma, a solução proposta nesta candidatura, apresenta um contributo notável para a melhoria da gestão de resíduos e da produção de energia. Importa salientar que a solução Plasma2Gas contempla a implementação de uma unidade piloto de gasificação de resíduos a alta temperatura, recorrendo a plasma induzido por micro-ondas, produção de gás de síntese, e sua utilização na geração de energia elétrica suficiente para tornar todo o sistema autossuficiente, resultando ainda um excesso de energia (gás ou eletricidade) que poderá ser utilizada em qualquer outro processo que dela necessite.

No final do projeto existirá um equipamento inovador assente na tecnologia de gasificação por plasma induzido por micro-ondas, gerida por um software industrial capaz de efetuar os devidos ajustes a todo o equipamento, garantindo a sua eficácia em vários cenários. Este projeto visa não só solucionar dois problemas estruturais da sociedade atual, produção e gestão de resíduos e produção de energia, assim como desenvolver tecnologia radicalmente avançada como a transformação de energia elétrica em energia térmica por plasma induzido por micro-ondas. Esta tecnologia de plasma induzido por micro-ondas permitirá ao consórcio, intervir em qualquer indústria que necessite de energia térmica no seu processo.

A solução Plasma2Gas permitirá gerar dois produtos passíveis de ser reintegrados na economia circular, na forma de energia e escória vitrificada (material inerte utilizável na construção civil). Assim sendo, os resultados deste projeto permitirão dotar empresas geradoras de lamas de depuração de autonomia na gestão interna deste resíduo, eliminando esse custo direto e gerando até mesmo energia necessária noutros processos produtivos. Da mesma forma, a título de exemplo, empresas gestoras de lamas de depuração poderão igualmente ser dotadas pela solução Plasma2Gas, de unidades de gasificação de lamas, que lhes permitirão rentabilizar unidades de triagem e/ou secagem, reduzir a quantidade final de lamas a depositar nas células de aterro, promover a eficiência e até mesmo a autossuficiência energética e como tal promover a vida útil dessas mesmas instalações valorizando a sua performance ambiental.

Adicionalmente, é possível concluir que a plena execução deste projeto poderá igualmente favorecer as políticas Nacionais e Internacionais em matéria de utilização de energia por via de fontes renováveis, promovendo a: procura de competitividade, que leve ao crescimento económico e à criação de emprego; segurança do abastecimento, reduzindo a dependência energética dos países; sustentabilidade, comprometendo-se com a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) [35].

## 1.2. Objetivos e solução proposta

O objetivo principal deste projeto centra-se no desenvolvimento de um sistema de gasificação de lamas de depuração em reator a alta temperatura através de plasma induzido por micro-ondas, com balanço energético positivo através da utilização do gás de síntese produzido. O sistema ou solução Plasma2Gas incluirá uma unidade unidades de alimentação de resíduos, uma unidade de gasificação por plasma

induzido por micro-ondas, uma unidade de tratamento térmico do gás de síntese, uma unidade de limpeza do gás de síntese, uma unidade de armazenamento e consumo do gás de síntese e uma unidade de controlo e automação de todo o sistema.

Pretende-se utilizar como matérias-primas para a alimentação do sistema proposto resíduos de lamas de depuração com origens e características físico-químicas distintas, como são o caso das lamas do tratamento de águas residuais domésticas (ETAR), lamas do tratamento da indústria do papel ou lamas de tratamento de outras unidades industriais. Estes resíduos serão preparados e otimizados na unidade de alimentação de resíduos, em termos de granulometria e humidade, sendo depois encaminhados para um reator a alta temperatura onde a presença de oxigénio é controlada, ocorrendo o processo de gasificação por oxidação. O calor necessário será fornecido por tochas de plasma induzido por micro-ondas. Do processo de gasificação resulta uma escória vitrificada (material inerte) e um gás de síntese bruto. O gás de síntese produzido será arrefecido na unidade de Tratamento Térmico do Gás de Síntese, nomeadamente num permutador de calor e esse calor utilizado no processo de secagem dos resíduos. Seguidamente, no sistema de Limpeza do Gás de Síntese, os contaminantes do gás de síntese serão removidos por filtros físicos, neutralizados os ácidos através de uma lavagem com solução alcalina e purificados através de uma adsorção. O gás de síntese resultante será posteriormente encaminhado para a unidade de Armazenamento e Consumo do Gás de Síntese, onde será pressurizado, armazenado e utilizado para abastecer um gerador elétrico que produzirá a energia necessária a todos os equipamentos da solução Plsma2Gas. O gás em excesso poderá ser utilizado para gerar energia ou queimado controladamente. Por sua vez, a unidade de Controlo e Automação irá controlar todo o sistema. Todos os resultados serão utilizados para elaborar uma base de dados sobre a qual será validado e testado o software de controlo.

A utilização e valorização destes resíduos por processos de gasificação por plasma para a produção de gás de síntese, alinha-se perfeitamente nas atuais políticas Nacionais e Internacionais sobre gestão de resíduos. No caso Português, o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR 2014-2020), o Plano Estratégico para a Economia Circular, etc., preconizaram medidas que reforçam o papel da valorização destes materiais, como força motriz para o cumprimento dos objetivos e metas delineados. Também é de considerar que vivemos numa sociedade que se encontra a experienciar problemas como o aumento do preço do petróleo e do aquecimento global causado pela utilização de combustíveis fósseis. Neste sentido, a utilização do gás de síntese proveniente da valorização termoquímica de gasificação por plasma poderá ser um exemplo de uma energia renovável não convencional. Desta forma, os resultados previstos neste projeto reforçaram o cumprimento das metas e objetivos traçados no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020.

Pretende-se assim desenvolver um sistema que assentará num processo de transformação térmica e de valorização de resíduos de diferentes setores económicos que terá como objetivos macro:

- **Valorização de Recursos:** utilização de lamas de depuração como recurso e de forma transversal, pois serão utilizadas lamas de origens distintas;
- **Melhoramento termoquímico das propriedades das lamas de depuração:** otimização da humidade e granulometria na unidade de alimentação de resíduos;
- **Eficiência Energética:** conversão do gás de síntese em energia elétrica para alimentação do gasificador a plasma induzido por micro-ondas, garantindo a sua autossuficiência energética;

- **Melhoria ambiental e redução das emissões de carbono:** o gás de síntese produzido em excesso poderá ser utilizado para gerar energia com baixa pegada de carbono;
- **Controlo das Emissões:** desenvolvimento de um sistema de gasificação com zero impactos ambientais, através da remoção de contaminantes nos efluentes gasosos do sistema e valorização da escória vitrificada.
- **Controlo e Automação do Sistema:** desenvolvimento de software dedicado à gasificação de lamas de depuração por plasma induzido por micro-ondas. No final do projeto, o consórcio, será detentor de uma unidade demonstrativa da tecnologia adaptável a várias tipologias de resíduos de uma forma completamente automática e controlada.
- **Melhoria económica do processo de gasificação:** a utilização de micro-ondas reduzirá o custo e tempo paragem para manutenções das tochas;
- **Melhoria económica do setor da gestão de lamas de depuração:** a valorização das lamas de depuração permitirá reduzir substancialmente o custo da sua gestão, através da eliminação do custo associado à sua deposição em aterro e através da produção de energia renovável.

#### >Arquitetura/Estrutura da Solução

Importa salientar que a descrição pormenorizada da solução Plasma2Gas teve como pressupostos iniciais o trabalho já iniciado pela empresa promotora líder do projeto. Este trabalho, financiado com fundos próprios, envolveu todos os parceiros da presente candidatura. Neste trabalho à escala laboratorial foi identificado o potencial técnico, ambiental e económico da gasificação de lamas de depuração por plasma induzido por micro-ondas. Foi então possível concluir e validar o conceito adjacente a esta candidatura (TRL3). Nesse trabalho foram igualmente identificadas algumas tecnologias passíveis de tornar o processo proposto mais eficiente, do ponto de vista energético e ambiental. De seguida apresenta-se a arquitetura da solução Plasma2Gas:



reator. Este equipamento de secagem terá de trabalhar em linha, de uma forma contínua e lidar com a tipologia de resíduos pretendida.

- Alimentação de resíduos para homogeneização - Os resíduos previamente secos, serão recolhidos por outro transportador de parafuso idêntico ao utilizado na alimentação de resíduos para trituração.
- Alimentação do reator - A entrada desta massa de resíduos no reator também terá que ter um fluxo constante e garantir que o ponto de acesso garanta estanquicidade com o ambiente exterior uma vez que dentro do reator a atmosfera terá níveis de oxigénio controlados. A alimentação do reator será efetuada por um transportador de parafuso, que neste caso girará dentro de um tubo em vez de uma caleira, para garantir estanquicidade no abastecimento do reator com os resíduos.

## 2 Unidade de Gasificação por plasma induzido a micro-ondas

O reator de gasificação, será o local onde os resíduos serão submetidos a altas temperaturas para que ocorra a quebra das moléculas de hidrocarbonetos em cadeias simples de constituintes do gás de síntese. Tal como já referido, este processo é um processo de oxidação onde além da temperatura é importante controlar os níveis de oxigénio no sistema. Assim este reator essencialmente será uma câmara estanque com entrada controlada de resíduos, de oxigénio em quantidades controladas e saída de gás de síntese e de escória fundida. A unidade de gasificação considerará os seguintes equipamentos ou processos:

### 2.1 Produção de oxigénio

Uma vez que existirá uma fonte de água do processo de limpeza do gás e arrefecimento da escória, que não poderia ser devolvida ao meio hídrico sem tratamento, será efetuada a sua eletrólise, resultando este processo em oxigénio puro e hidrogénio. O sistema de eletrólise consistirá num reservatório que recolherá a água proveniente do sistema de arrefecimento e solidificação da escória que por sua vez teve origem na lavagem do gás de síntese. Por ação da passagem de uma corrente elétrica na água são quebradas as ligações químicas das moléculas de água, resultando na libertação de hidrogénio e oxigénio gasosos.

### 2.2 Pressurização

No sistema de abastecimento de gases para as tochas serão utilizados diferentes tipos de gases. Assim, no que toca a gases pressurizados, existirá um ramal de acoplamento de recipientes pressurizados ao sistema de abastecimento, com caudal regulado por válvulas controladas eletricamente.

### 2.3 Gasificação das lamas de depuração

O processo de gasificação ocorrerá, como já referido num reator em condições de temperatura, pressão e níveis de oxigénio controlado. O reator será composto de várias camadas que irão garantir a sua estanquicidade e resistência a altas temperaturas. A camada interior será em material refratário resistente a altas temperaturas como é o caso dos blocos refratários à base de zircónio e cálcio que conseguem ter resistência estrutural até temperaturas na ordem dos 2.000°C. a taxa de condutividade térmica destes blocos é de cerca de 70% o que quer dizer que dentro do reator a funcionar a uma temperatura de 1.200°C teremos a face oposta dos blocos a cerca de 840°C.

O processo de gasificação apresentado nesta tecnologia pretende ser versátil e configurável por forma a satisfazer as diferentes necessidades e especificidades dos clientes em função dos diferentes tipos e características dos resíduos disponíveis. Desta forma a monitorização das condições de operação no interior do reator, principalmente no que diz respeito à temperatura mostram-se indispensáveis. Serão assim instaladas 8 sondas de temperatura, a diferentes alturas do reator para que se monitorize devidamente em todo o reator, em tempo real, o processo. Estas sondas de temperatura caracterizam-se por serem resistentes a este espectro de temperaturas e fornecerão à unidade de controlo dados vitais do processo de gasificação.

#### 2.4 Tochas de plasma por micro-ondas

O processo de gasificação acontece em ambientes de altas temperaturas, pelo que será fornecida ao reator, energia térmica sob a forma de plasma induzido por micro-ondas. Este fornecimento será feito através de 6 tochas de plasma colocadas perifericamente no bloco inferior do reator. As tochas de plasma consistem em 4 componentes importantes: Gerador de micro-ondas, o guia de ondas para acoplamento das micro-ondas ao tubo de quartzo onde é gerado o plasma (área de injeção do gás de transporte) e sistema de arrefecimento.

As tochas serão alimentadas por gerador micro-ondas tipo magnetrão com uma frequência de excitação 2.45Ghz. As potências normalmente geradas por este tipo de magnetrão são baixas, variando entre 2KW a 10KW. A utilização destas tochas permite a obtenção das temperaturas de gás muito elevadas, no entanto será necessário otimizar o plasma criado por este tipo de tochas e garantir a estabilidade do plasma gerado por longos períodos de tempo. Para tal será estudada a dimensão da pluma de plasma, temperatura do gás em função de vários parâmetros de operação com fluxo de gás injetado, composição da mistura gasosa (vapor de água, ar atmosférico, oxigénio, hidrogénio), potência de micro-ondas injetada. Este estudo será feito por simulação da tocha recorrendo ao programa COMSOL e validada por ensaios experimentais.

A necessidade de garantir a estabilidade do plasma por longos períodos requer o desenvolvimento de um sistema de automatização do arranque e controlo em tempo real da potência de micro-ondas injetada/refletida, controlo do fluxo de gás, composição da mistura, temperatura do tubo de quartzo, fluxo de água para arrefecimento da tocha.

#### 2.5 Escória produzida

A referida escória resultante da fusão de cadeias inorgânicas que não gasifiquem, entra em fusão e drenam pelo fundo do reator. Com efeito, estes produtos inorgânicos são vendáveis o que traz valor comercial acrescido a todo o sistema. O material obtido consiste numa ampla lista de compostos minerais, que sendo vitrificados, ficam inertes e não são lixiviantes pelo que podem ser usados num vasto leque de aplicações, como a construção civil, asfaltamento e outros produtos.

### 3 Unidade de Tratamento Térmico do Gás de Síntese da solução Plasma2Gas

O processo de gasificação de resíduos gera um gás de síntese a alta temperatura. Durante esse processo qualquer cadeia orgânica contaminante que exista acaba por ser decomposta em moléculas simples. No entanto, é imprescindível arrefecer de uma forma relativamente rápida este gás após a sua formação para evitar a reformação de dioxinas e furanos através de uma perda de energia do gás produzido (para temperaturas inferiores a 400°C. Existem várias formas de arrefecimento do gás sendo que o aproveitamento da energia térmica libertada neste processo valoriza o rendimento final do sistema.

Desta forma, neste projeto será instalado um permutador de calor, onde a energia térmica contida no gás será transferida para um meio de transporte, que será água que por sua vez será utilizada como meio de aquecimento do processo de secagem dos resíduos na entrada do processo. O permutador de calor consiste numa unidade por onde o gás passa sob estruturas laminares onde circula a água de arrefecimento maximizando assim a área de contacto entre os dois meios. Este meio de transporte de energia térmica (água) será impulsionado por uma bomba de água resistente a temperaturas de 400°C e com capacidade de operação até 8 bar de pressão. Tendo em atenção que poderá existir energia térmica disponível em excesso, isto é, não ser necessário todo o vapor de água no processo de secagem de resíduos, será estudada a pertinência de aproveitamento dessa energia através de uso de turbinas ou similares; no entanto, nesta fase deste projeto não está contemplada a instalação desse tipo de equipamento, pelo que essa referida energia em excesso, será dissipada através de radiador que será instalado no circuito de água.

A redução da temperatura nesta estrutura também será monitorizada por um sensor de temperatura com conexão à central de controlo. Será também monitorizada a pressão no sistema de tubagens onde circula a água através de um sensor de pressão. A quantidade de vapor que será encaminhado para o secador de resíduos ou para o radiador será controlada por válvulas elétricas controladas na central de controlo. Essa quantidade será definida analisando parâmetros no processo de secagem dos resíduos, temperatura no processo, etc.

#### **4 Unidade de Limpeza do Gás de Síntese da solução Plasma2Gas**

A unidade da limpeza do Gás de Síntese considerará os seguintes equipamentos ou processos:

##### **4.1 Separador ciclónico**

Uma das primeiras etapas da limpeza do gás de síntese, consiste na remoção de partículas de cinza em suspensão no gás. Este processo, neste projeto, será efetuado através de um separador ciclónico, onde as partículas são extraídas através de um processo de centrifugação dos gases. Este fenómeno ocorre com a indução de um escoamento rotativo no interior do ciclone. Isto ocorre devido à significativa velocidade (típica de 22 m/s ou 79,2 km/h) com a qual os gases entram tangencialmente na câmara do ciclone, de formato cónico. Sendo muito mais densas que os gases, as partículas têm maior tendência em permanecer na trajetória tangente ao escoamento rotativo e assim colidir com as paredes da câmara. Com as colisões, as partículas perdem velocidade e tendem a desacoplar-se do gás, caindo em direção ao fundo da câmara, de onde são extraídas. Os gases saem através do tubo central do ciclone, após percorrerem algumas voltas pela câmara e uma curva de ângulo acentuado em direção à entrada do tubo, o que também dificulta a saída de sólidos. Desta forma, os sólidos (cinza) recolhidos do gás, serão reintroduzidos no processo através da sua inclusão na tremonha de material dissipador de calor.

##### **4.2 Filtro mangas**

Depois de removidas as partículas com maior massa e volume no separador ciclónico, serão removidas as partículas ainda com dimensões inferiores, geralmente com tamanho inferior a 5 micrómetros. Este processo de filtragem ocorrerá num filtro de mangas instalado. Este processo de filtragem dá-se pela introdução do gás no compartimento das mangas de filtragem. As partículas ficam retidas no tecido das mangas e o ar já isento de partículas é direcionado para os bocais do filtro.

#### 4.3 Lavador de gases

No processo de purificação do gás de síntese, depois de removidas as partículas em suspensão no gás, será necessário remover também alguns compostos, como o amoníaco, cloretos ou alguns tipos de ácidos. Desta forma, será instalado um lavador de gases, que consiste num equipamento que remove material particulado do fluxo de gás através da colisão destas partículas com gotas de um meio de lavagem, que geralmente é água com adição de uma solução alcalina para neutralização dos ácidos. A fonte de água para este equipamento provém de condensação de vapor de água que resulta da secagem de resíduos que antes de ser utilizada na lavagem de gases será preparada numa solução com hidróxido de sódio para neutralização dos ácidos existentes no gás.

#### 4.4 Câmara de carvão ativado/carbonato de cálcio

Finalmente, o gás será conduzido através de uma câmara que contem um meio de filtração sólido com o objetivo de promover a adsorção de compostos orgânicos, fluoretos, compostos à base de enxofre, etc. Este meio de filtração será uma mistura entre carvão ativado e carbonato de cálcio.

### 5 Unidade de Armazenamento do Gás de Síntese da solução Plasma2Gas

A unidade Armazenamento do Gás de Síntese considerará os seguintes equipamentos ou processos:

#### 5.1 Pressurização do gás de síntese

O gás depois de purificado, será pressurizado através de uma bomba, e armazenado num reservatório que funciona como um ponto intermédio antes do seu consumo.

#### 5.2 Geração de energia elétrica

O gás de síntese possui aptidão para diversas aplicações. No nosso caso, será utilizado para geração de energia elétrica através da sua combustão em motor a gás, uma vez que não apresenta qualquer tipo de perigo para o ambiente depois de devidamente limpo nos processos anteriormente descritos. O equipamento utilizado para a produção de energia elétrica através do consumo de gás de síntese, será um gerador elétrico adaptado a funcionamento com gases com este tipo de poder calorífico.

#### 5.3 Utilização da energia

O processo de descrito neste projeto possui vários equipamentos alimentados por energia elétrica. Desta forma, e uma vez que o gás de síntese produzido possui uma energia química em potência superior à consumida em todo o processo, será utilizado o gás de síntese produzido para gerar energia elétrica que tornará o sistema autossuficiente.

#### 5.4 Queima de gás em excesso

Prevê-se uma quantidade de gás produzida superior à consumida pelo gerador. Desta forma, esse gás em excesso será queimado em torre de queima controlada.

### 6 Unidade de Controlo da solução Plasma2Gas

Todos os sistemas de monitorização e comando dos diversos equipamentos serão reunidos numa central de controlo. Essa central, onde correrá o software desenvolvido, comandará e adaptará todo o processo em função dos parâmetros recolhidos durante a fase de investigação e os parâmetros de operação dos equipamentos.

## 7 Sistemas de Segurança da solução Plasma2Gas

No processo de condução de gás e de condução das águas de arrefecimento assim como nas águas de limpeza de gás, serão utilizadas tubagens de várias dimensões, flanges, acessórios de ligação, etc. Da mesma forma, serão instalados vários varandins de acesso, estruturas de segurança e proteção, sistemas de fixação de vários equipamentos.

### 1.3. Caracterização e fundamentação técnica

#### > Estado da Arte na área Fundamental do Projeto

Relativamente às lamas de depuração, segundo a definição sugerida pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), em sentido lato, pode definir-se lama como sendo a “mistura de água e de sólidos separada de diversos tipos de água como resultado de processos naturais ou artificiais”. Esta definição permite englobar as lamas resultantes do tratamento de águas residuais urbanas, de águas para abastecimento público, de efluentes líquidos das explorações pecuárias, de efluentes das indústrias agroalimentares, de efluentes de outras indústrias, etc [9].

Segundo Varennes (2003), a composição das lamas é muito variável, pois depende do teor de água, do grau de degradação do material orgânico e do teor de metais. Os efluentes industriais são normalmente mais ricos em elementos vestigiais do que os urbanos. Por este motivo, a possibilidade duma lama ser valorizada e as suas condições de aplicação dependem da sua composição, avaliada por intermédio de análises laboratoriais, em particular através da avaliação dos parâmetros que possam influenciar o método de valorização. No entanto, as características químicas das lamas de depuração indicam elevados teores em carbono (superiores a 50%), matéria orgânica e consecutivamente um elevado poder calorífico. Estas características potenciam a valorização termoquímica deste tipo de resíduo, por gasificação [10].

Hall (1995) efetuou uma revisão bibliográfica acerca dos efeitos da valorização agrícola das lamas, nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos e conseqüente nível de produção e acumulação de metais pesados nas plantas. Todos os casos analisados resultaram num aumento significativo da produção, pelo que o uso da lama, salvaguardando condições anómalas, é favorável para uma sociedade sustentável, uma vez que recicla uma grande quantidade de nutrientes e matéria orgânica [11].

No entanto importa salientar que a aplicação do resíduo de lama desidratada apresenta legislação própria, o Decreto-Lei nº 276/2009. Este Decreto-Lei impõe limites para os metais pesados (cádmio, cobre, níquel, chumbo, zinco, mercúrio e crómio), os poluentes orgânicos (AOX, LAS, DEHP, NPE, PAH, PCB e PCDD/F) e os microrganismos patogénicos (*Salmonella* spp. e *Escherichia coli*), que deverão ser respeitados. Caso estes parâmetros encontrem-se acima dos limites impostos pela legislação em vigor, este resíduo deverá ser encaminhado para outras vias de valorização ou de destino final [12]. Tendo presentes os princípios da política de gestão de resíduos, o destino final das lamas deverá ainda estar condicionado pela hierarquia de gestão de resíduos, que estabelece as seguintes prioridades: Prevenção e redução da produção de resíduos; Preparação para a reutilização, reciclagem e valorização energética; A eliminação deverá ser a última opção de gestão, e apenas quando não seja possível aplicar as alternativas apresentadas anteriormente, nomeadamente através da deposição em aterro ou da

incineração sem valorização energética. Estas preferências de gestão são consideradas no Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020, nomeadamente na ação OP3.A1 “Estabelecer e implementar um programa de ação para promover a procura de materiais passíveis de valorização”, na qual se indica que se devem privilegiar as soluções que visem:

- A redução da produção de lamas através de tecnologias que minimizem os subprodutos gerados no processo;
- A redução do volume das lamas através de tecnologias de desidratação, secagem ou compressão;
- A reutilização das lamas, devidamente inertizadas e compostas;
- A valorização energética das lamas;
- A deposição de lamas em aterro quando as suas características não permitam a reutilização [2].

Samolada e Zabaniotou (2014) realizaram um estudo de avaliação do potencial de valorização energética de lamas de depuração (residuais e industriais). De acordo com a análise SWOT realizada pelos autores, a valorização desta tipologia de resíduos por gasificação apresenta as seguintes forças: elevada eficiência de recuperação energética, redução das emissões com gás com efeito de estufa, possibilidade de tratar grande parte dos compostos inorgânicos presentes nas lamas, o gás de síntese pode ser utilizado para a produção de energia, elevada disponibilidade de matéria-prima e possibilidade de adição de outras matérias-primas no processo. Como fraquezas, os autores consideram: cinzas podem apresentar metais pesados, o que induz a categoria de perigosidade às mesmas, tecnologia complexa e com elevado custo, necessidade de remoção do teor de água, com exceção da gasificação por plasma. Considerando o exposto, os autores concluem que existe um enorme potencial técnico, económico e ambiental na implementação desta metodologia de valorização [13].

## **Gasificação**

Em termos genéricos, a Gasificação é tradicionalmente definida como a combustão parcial de substâncias orgânicas com vista à produção de gases que podem ser usados como matéria-prima (através de processos de recuperação) ou como combustível [21]. O combustível gasoso contém, normalmente, os seguintes elementos: CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos, inertes presentes no agente de gasificação, cinzas, resíduo carbonoso e partículas. A quantidade de resíduo carbonoso formado no processo de gasificação depende do tipo de matéria-prima que é usada, do tipo de gasificador e das condições de operação (temperatura, relação agente de oxidação/matéria-prima e tempo de residência).

Estudos recentes demonstram que a gasificação de resíduos apresenta várias vantagens em relação a processos tradicionais como a incineração, nomeadamente [22].

- A depuração do efluente gasoso pode ser realizada no gás de síntese em vez de um maior volume de efluentes gasosos resultantes da combustão;
- É possível gerar eletricidade através do acoplamento de motores e turbinas, sendo estas opção mais baratas e eficientes do que os ciclos de vapor utilizados na incineração. Também existe o potencial de utilizar células de combustível apesar de a sua aplicação envolver elevados requisitos quanto à pureza do gás;

- O processamento químico do gás de síntese pode ser utilizado como forma de produzir combustíveis sintéticos em vez de eletricidade;
- Alguns processos de gasificação permitem o tratamento de cinzas que contêm metais pesados a temperaturas muito elevadas o que permite que estes sejam libertados numa forma vítrea e quimicamente estável.

Os produtos passíveis de ser obtidos pelos processos de gasificação são de variado tipo: gás de síntese, misturas de hidrocarbonetos líquidos e sólidos (carvão). No caso concreto deste projeto, o processo tecnológico será orientado para a maximização da produção de gás de síntese. Esse gás pode posteriormente ser utilizado numa imensa gama de aplicações, incluindo caldeiras de vapor, motores a gás para a conversão em calor e eletricidade potencialmente com cada vez mais eficiência.

Um dos maiores desafios para a aplicação comercial de tecnologias é a obtenção de uma eficiência elétrica bruta que torne a sua implementação rentável. Apesar de este processo já possuir uma eficiência considerável na transformação de gás de síntese em eletricidade, a depuração dos efluentes gasosos representam custos elevados que podem anular economicamente as vantagens da utilização destes sistemas na produção de eletricidade. Outro desafio torna-se evidente quando se procede à implementação em escala real, uma vez que é necessário fechar as instalações a cada poucos meses de forma a proceder à limpeza do reator [23].

Entre as diferentes arquiteturas de gasificadores existentes destacam-se os de leito fixo (Fixed Bed Gasifier), leito fluidizado (Fluidized Bed Gasifier) e leito fluxo arrastado (Entrained Flow Gasifier). Adicionalmente também é de destacar o aparecimento de Gasificadores de Plasma.

### **Gasificação por Plasma**

Em termos genéricos, um plasma é criado pela aplicação de campos elétricos elevados a um gás, ocorrendo a sua rutura dielétrica. Quando a quantidade de partículas carregadas (tanto positivas como negativas) é suficientemente alta, o gás torna-se condutor de eletricidade. Neste momento, as partículas carregadas que se encontram num elevado estado de excitação, colidem violentamente umas com as outras, libertando grandes quantidades de energia sobre a forma de calor e luz e produzindo novas partículas carregadas, resultando num gás ionizado ou plasma, correspondente ao quarto estado da matéria. Dependendo do tipo de fonte energética ou das condições sob o qual o plasma é criado, podem-se atingir temperaturas de gás entre os 5.000°C a 7.000°C no caso dos plasmas atmosféricos [24]. De acordo com Sanlisoy e Carpinlioglu (2017), a tecnologia de plasma pode ocorrer a diferentes temperaturas e densidades, no entanto, deverá ser fornecida energia suficiente para sustentar o processo, senão as partículas carregadas recombina-se e transformam-se num gás neutro. De acordo com os mesmos autores, a energia para formar o plasma pode ser elétrica, térmica, luminosa, etc. [25].

Conforme verificado, a tecnologia de plasma é um processo bastante complexo e que depende de diversos fenómenos químicos e físicos entre partículas e materiais. Esta tecnologia apesar de não ser recente, tem sido nos últimos anos aplicada com sucesso ao tratamento de resíduos. De facto, a sua utilização como fonte de calor nos fornos metalúrgicos é bem documentada e as tecnologias de deposição baseadas no plasma são um método padrão de aplicação de revestimentos de camada fina para uma variedade de substratos, incluindo vidro, cerâmica e aplicações comerciais. Porém, conforme foi referido, os últimos avanços e aplicações desta tecnologia baseiam-se no tratamento de resíduos

perigosos e não perigosos [26]. Comparativamente com outras tecnologias de tratamento e valorização de resíduos, os sistemas com plasma permitem tratar resíduos com uma ampla gama de poderes caloríficos, particularmente os resíduos inorgânicos de baixo poder calorífico, e os resíduos orgânicos com elevado conteúdo em água (e.g. lamas de depuração). Os principais subprodutos do processo são um resíduo sólido vitrificado (resíduos inertes) e um gás de síntese. Este gás de síntese apresenta constituição variável, pois depende do agente ou atmosfera de oxidação, no entanto, é genericamente constituído por monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H<sub>2</sub>) e pequenas quantidades de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e azoto (N<sub>2</sub>). Dependendo das condições operacionais e da tipologia de resíduos a tratar, o gás de síntese pode conter igualmente concentrações residuais de cinzas, ácido clorídrico (HCl), ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), Amónia (NH<sub>3</sub>) ou outros compostos orgânicos e inorgânicos que necessitam ser removidos [27].

A principal saída sólida dos processos de plasma é a escória vitrificada, que pode ser reciclada (existe mercado). O metal fundido também pode ser recuperado de alguns processos em que há metais voláteis suficientes nos resíduos. Alguns processos podem ser projetados para produzir um gás quase completamente oxidado com baixos níveis de poluentes, enquanto outros processos permitem a produção de um gás de síntese, que pode ser queimado para produzir energia ou também pode ser usado como matéria-prima química. Portanto, as tecnologias de plasma oferecem flexibilidade significativa e é possível configurar sistemas para maximizar a recuperação de recursos. Os processos plasmáticos têm sido historicamente considerados como excessivamente complexos, caros e difíceis de implementar. Problemas tais como a vida útil do eletrodo e os elevados requisitos de energia foram vistos como obstáculos importantes para a comercialização da tecnologia para aplicações em grande escala [25].

De acordo com Gray (2014), as vantagens dos processos de tratamento e valorização de resíduos utilizando plasma são as seguintes:

- Capacidade de tratar diversas tipologias de resíduos;
- Necessidade de escalas de processamento menores que outras tecnologias – inceneração;
- Tecnologia complexa, mas adaptativa, ou seja, é possível promover alterações na configuração do sistema para tratamento de resíduos com necessidades especiais;
- Formação de um resíduo sólido vitrificado e portante inerte;
- Tecnologicamente mais avançada que a incineração convencional, nomeadamente no controlo das emissões gasosas;
- Processo realizado a temperaturas extremamente elevadas e que promovem a completa conversão dos resíduos [28].

De acordo com o objeto de estudo deste projeto, apenas será referido a gasificação por plasma. Como referido anteriormente, a gasificação por plasma ocorre a elevadas temperaturas devido ao sistema de aquecimento por tocha de plasma, localizado na parte inferior do gasificador, tal como indica a Figura 2. Estas elevadas temperaturas de operação quebram a matéria-prima e/ou os componentes tóxicos nos seus respetivos elementos constituintes, aumentando drasticamente a cinética das diversas reações que ocorrem na zona de gasificação, convertendo toda a matéria orgânica em hidrogénio e monóxido de carbono. A matéria residual resultante dos constituintes inorgânicos da matéria-prima (incluindo metais pesados) podem ser fundidos originando escória vitrificada altamente resistente à lixiviação [30]. Como

resultado da alta temperatura de operação, os compostos tóxicos presentes nos resíduos são decompostos em elementos químicos inofensivos. Hlina et al (2014) referem que este facto, constitui a principal vantagem da gasificação por plasma comparativamente com os métodos convencionais de gasificação (Figura 3) [31].

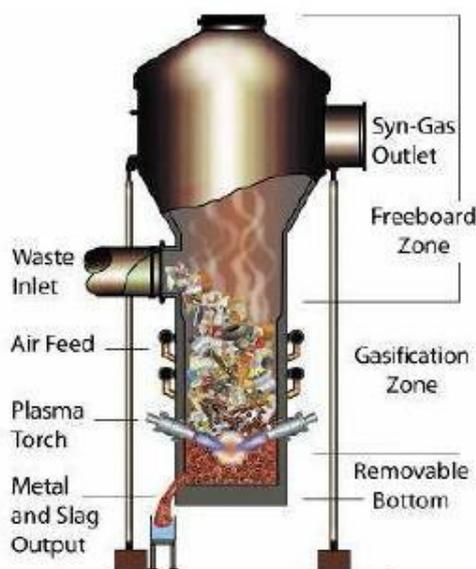


Figura 2. Gasificador de plasma [30].

A classificação da gasificação por plasma depende principalmente do tipo de descarga elétrica usado para criar o plasma e das características do reator. As descargas elétricas usadas podem ser por corrente contínua (DC), radiofrequência (RF) ou micro-ondas (MCW).

O desenvolvimento de fontes de plasma induzido por micro-ondas remonta à segunda guerra mundial, com a introdução de fontes de alimentação elétrica de alta potência em radares e sistemas de comunicação. Estas investigações levaram ao desenvolvimento de fontes de micro-ondas de vários quilowatts. O plasma induzido por micro-ondas, por comparação com outros tipos de plasma, por rádio frequência ou energia contínua, permite obter densidades eletrónica muito elevada ( $7 \times 10^{16} / m^3$ ), sendo assim muito mais eficiente a transferência de energia para o gás. O facto deste tipo de plasma ser induzido através de um campo eletromagnético, evita a existência de eléctrodos metálicos no interior do reator, como acontece nos plasmas criados por arco elétrico, acabando por ser uma grande vantagem e abre novos horizontes para a sua utilização no processo de gasificação, uma vez que o desgaste das tochas de plasma induzido por micro-ondas é muito reduzido resultando assim em paragens de manutenção muito reduzidas e custos de operação muito inferiores.

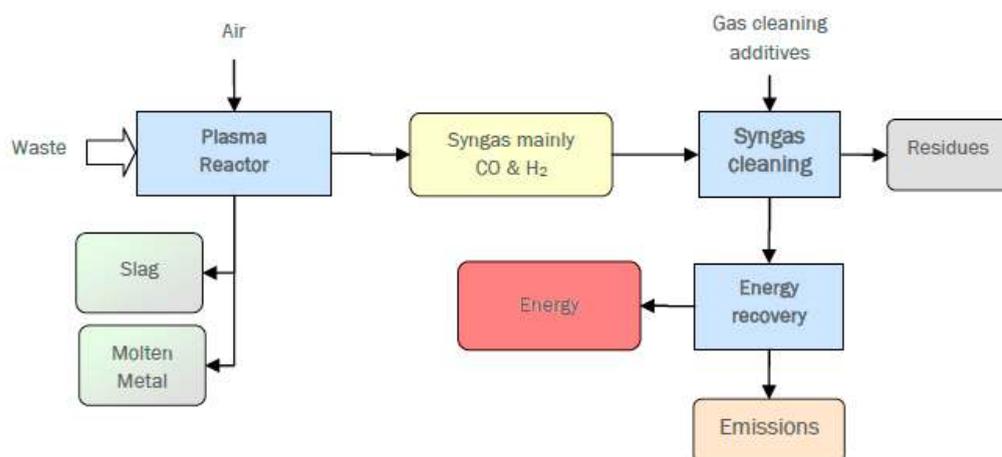


Figura 3. Digrama de um processo convencional de gasificação por plasma.

### > Posicionamento e Avanços Alcançados em relação ao Estado da Arte

Na tabela 1 apresenta-se os resultados de um estudo de benchmarking das tecnologias de gasificação realizado para esta candidatura. Os resultados demonstrados na tabela 1 permitem concluir que a tecnologia de gasificação por plasma induzido por micro-ondas apresenta melhores características técnicas, pois neste sistema não existe erosão do eléctrodo. Esta vantagem técnica é bastante relevante, pois a inexistência de substituição do eléctrodo que induz o arco eléctrico permite um funcionamento contínuo do processo. Do ponto de vista económico, esta vantagem técnica permite igualmente reduzir os custos operacionais, aumento consecutivamente a viabilidade económica do sistema.

Tabela 1. Benchmarking das tecnologias de Gasificação

Característica	Sistema de gasificação		
	Convencional	Plasma Térmico	Plasma por micro-ondas
Temperatura	1000-1800K	5000-10000K	4000-5000k
Erosão Eléctrodo	Não	Sim (1000-3000h em gases inertes, 200-500h em ambientes oxidativos)	Não
Flexibilidade de resíduos	Baixa, pode lidar com gama limitada de características de resíduos (humidade, cinzas, tamanho partículas)	Elevada, pode lidar com resíduos heterogéneos, com efeito na qualidade do syngas.	Elevada; apenas compatível com partículas de pequeno tamanho.

Qualidade do Syngas	Baixa, os melhores resultados são obtidos em ambientes oxidantes;	Elevada, devido às elevadas temperaturas;	Elevada, devido às elevadas temperaturas;
Estado de desenvolvimento	Aplicações industriais para geração de calor e de energia; projetos de demonstração para produção de biofuel.	Aplicações industriais para geração de calor e de energia; projetos de I&D para produção de biofuel.	Não há aplicações industriais; projetos de I&D para produção de syngas
Escala	Instalações de larga escala.	Instalações de média escala, sistemas modulares.	Instalações de pequena escala, restringida pela configuração do reator e frequência de micro-ondas usada.
Custo	Economia de escala; distribuição de custos (pré-tratamento, gasificação, limpeza) depende do tipo de sistema.	CAPEX e OPEX elevados (equipamento dispendioso, erosão dos eletrodos); Baixos custos de limpeza dos gases resultantes.	CAPEX e OPEX menor comparado com plasma térmicos; não há economia de escala, mas economicamente viável em pequenas escalas comparada com plasma térmicos.
Produtores de sistemas	Muitos produtores industriais de diferentes dimensões. Alguns players de grande dimensão com soluções no mercado.	Vários criadores tecnológicos de diferentes dimensões.	Poucos criadores tecnológicos e de pequena dimensão.

Apesar de recente a tecnologia de plasma apresenta atualmente diversas empresas que comercializam e implementam unidades de conversão por plasma em todo o mundo. No entanto, apenas algumas empresas comercializam esta tecnologia aplicada à conversão termoquímica por gasificação. Neste particular, é possível destacar as seguintes empresas: Arc Technologies, Encore Environmental Solutions, Enersol Technologies, EER, IET, GEoplasma, Hawkings Industries, Hitachi Metals, PEAT, PET, Plasco, Pyrogenesis, Solena, Soliton, Startech, Tetronics e Westinghouse. As restantes empresas comercializadoras desta tecnologia aplicam-na em processos de combustão, pirolise, vitrificação e polimento. Importa salientar que algumas destas entidades apenas apresenta unidades de demonstração da tecnologia e não unidades comerciais [29].

Conforme é possível observar na tabela 2, apenas as empresas Hitachi Metals, PEAT, Pyrogenesis e Westinghouse é que apresentam processos de conversão termoquímica de resíduos sólidos urbanos (RSU) ou lamas pela tecnologia de gasificação por plasma.

Tabela 2. Resíduos Sólidos sendo atualmente tratados em unidades comerciais utilizando a tecnologia de Plasma [29].

Empresa	Tipo de resíduo
---------	-----------------

---

Enersol Technologies	Munições
Arc Technologies	Resíduos de cortumes contaminados
Europlasma	Resíduos industriais perigosos, cinzas
IET	Resíduos industriais perigosos, resíduos hospitalares
Hitachi Metals	RSU, lamas
Meltran	Resíduos industriais perigosos, Resíduos radioativos
MSE	Resíduos industriais perigosos
PEAT	Cinzas, resíduos industriais perigosos, resíduos hospitalares, lamas
ReTech	Resíduos radioativos, munições
Pyrogenesis	RSU
Tetronic	Cinzas, solos
Westinghouse	RSU, lamas, cinzas

---

Relativamente à tecnologia proposta neste projeto, ou seja, gasificação de lamas de depuração em reator a alta temperatura através de plasma induzido por micro-ondas, não existem atualmente empresas que utilizem ou comercializem esta tecnologia para o tratamento de resíduos orgânicos (RSU, lamas, etc.). Conforme foi referido anteriormente as quatro empresas que apresentam unidades comerciais de tratamento de resíduos orgânicos por gasificação por plasma utilizam as tecnologias PDMR (Plasma Direct Melting Reactor process) e PGVF (Plasma Gasification and Vitrification Furnace) [29]. De facto, uma das características inovadoras da tecnologia proposta é introduzida pela incorporação da indução por micro-ondas do plasma. Ou seja, caso se prove a viabilidade técnica e económica da tecnologia proposta, a mesma apresentará caráter inovador a nível mundial. Neste particular, apenas destacam-se apenas alguns estudos a nível académico, nomeadamente na conversão de microalgas [32], biomassa e carvão [33] e polietileno [34]. **Assim, com a plena execução deste projeto, pretende-se avançar a tecnologia de gasificação de lamas de depuração por plasma induzido por micro-ondas, de um TRL3 (prova de conceito) para um TLR5 (protótipo desenvolvido e validado).**

Conforme já fora referido, o objetivo principal deste projeto centra-se no desenvolvimento de uma unidade de gasificação de lamas de depuração em reator a alta temperatura através de plasma induzido por micro-ondas, com balanço energético positivo através da utilização do gás de síntese produzido. Paralelamente, pretende-se utilizar como matérias-primas para a alimentação do sistema proposto resíduos de lamas de depuração com origens e características físico-químicas distintas, como são o caso das lamas do tratamento de águas residuais domésticas (ETAR), lamas do tratamento da indústria do papel ou lamas de tratamento de outras unidades industriais. A utilização e valorização destes resíduos por processos de gasificação por plasma para a produção de gás de síntese, alinha-se perfeitamente nas atuais políticas Nacionais e Internacionais sobre gestão de resíduos. No caso Português, o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR 2014-2020), o Plano Estratégico para a Economia Circular, etc., preconizaram medidas que reforçam o papel da valorização destes materiais, como força motriz para o cumprimento dos objetivos e metas delineados. Também é de considerar que vivemos numa sociedade que se encontra a experienciar problemas como o aumento do preço do petróleo e do aquecimento global causado pela utilização de combustíveis fósseis. Neste sentido, a utilização do gás de síntese proveniente da valorização termoquímica de gasificação por plasma poderá ser um exemplo de uma energia renovável não convencional. Desta forma, os resultados previstos neste projeto reforçaram o cumprimento das metas e objetivos traçados no Plano Nacional de Ação para a Eficiência

Energética para o período 2013-2016 e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020.

Desta forma, facilmente se pode afirmar que este projeto contribuirá para a transição do modelo linear de produção de bens e serviços, para um modelo circular (Economia Circular), defendendo que os resíduos devem ser transformados, através da inovação, em potenciais subprodutos ou outros materiais, que promovam a reutilização, recuperação e reciclagem.

Desta forma o consórcio da solução Plasma2Gas pretende desenvolver um conjunto de componentes que representam um avanço técnico face ao estado de arte. Destaca-se, o desenvolvimento dos seguintes novos componentes inovadores:

- 1. Transversalidade do sistema a um conjunto diferenciado de lamas de depuração** (lamas de ETAR, lamas industriais, lamas da indústria do papel, etc.);
- 2. Sustentabilidade e Eficiência energética** das empresas contribuindo para a redução dos custos de produção das empresas e paralelamente o impacto ambiental através do reaproveitamento do gás de síntese para a produção de energia;
- 3. Otimização da conversão de energia elétrica em energia calorífica** recorrendo à tecnologia inovadora de plasma induzido por micro-ondas;
- 4. Otimização das condições operacionais de gasificação por plasma de lamas de depuração** através do seu controlo automático, ao nível da secagem, homogeneização e preparação das matérias-primas, do controlo da injeção de oxigénio no sistema proveniente da hidrólise do vapor de água resultante da secagem com eletricidade do gerador e do armazenamento do gás;
- 5. Redução do tempo de paragem para manutenções das tochas** devido ao seu desgaste, pois será desenvolvida uma tecnologia que não utiliza os eléctrodos convencionais;
- 6. Controlo e padronização das características do gás de síntese** formado no processo, através da trituração e homogeneização dos resíduos e principalmente das ações de limpeza do gás, que incluem o arrefecimento rápido em permutador de calor, a limpeza das cinzas num sistema de ciclone e retorno das cinzas à mistura de abastecimento de resíduos e limpeza dos vários contaminantes do gás de síntese através do desenvolvimento da camara de carvão ativado e carbonato de cálcio e do sistema de lavagem dos gases;
- 7. Autossustentabilidade energética do processo e do sistema** através da utilização do gás de síntese formado em motor para fornecimento de energia ao sistema. Adicionalmente, prevê-se igualmente a utilização de energia calorífica obtida no permutador de arrefecimento do gás de síntese para a secagem dos resíduos.
- 8. Controlo e manutenção do sistema**, nomeadamente através da utilização de tecnologias de monitorização das condições operacionais e das emissões gasosas e do desenvolvimento ao nível do design do gasificador que permita a limpeza periódica do mesmo.

## REFERENCIAS

- [1] Pinto, S.C., "Caracterização de Combustíveis Derivados de Resíduos Obtidos a Partir de Resíduos Industriais Não Perigosos", Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [2] Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020, 2014, 140 pp.
- [3] PERSU 2020, Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos 2020, 2014, 125 pp.
- [4] Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal. Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017.

- [5] INE – Instituto Nacional de Estatística, 2016. Estatística dos Resíduos 2014. ISBN: 978-989-25-0348-6, 106 pp.
- [6] Decreto-Lei 73/2011
- [7] Leckner B, “Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units”. *Waste Manag*, 2015;37:13-25, 2015.
- [8] ISWA – Internacional Solid Waste Association, 2016. Circular economy: Energy and Fuels, 48 pp.
- [9] Dias, J.C.S., 2004. Guia de boas práticas – Aplicação de Lamas na Agricultura. Lisboa. Reciclamas Multigestão Ambiental, S.A., Lisboa. 159 Pp.
- [10] Varennes, A. 2003. Produtividade dos solos e do Ambiente. Editora Escolar. 465 pp.
- [11] Hall, J.E., 1995. Sewage sludge production – Treatment and disposal in the European Union. *Water and Environmental Management*, 9 (4), 335-343.
- [12] Decreto-Lei n.º 276/2009, de 2 de outubro relativo à valorização agrícola de lamas de ETAR.
- [13] Samolada, M.C., Zabaniotou, A.A., 2014. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management* 34, 411–420.
- [14] C. Malins, S. Searle, A. Baral, D. Turley, Biobased Feedstocks, L. Hopwood, et al., *Wasted - Europe’s Untapped Resource: An Assessment of Advanced Biofuels from Wastes & Residues*, 2013.
- [15] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia, Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro, *Diário Da República 1a Série*. 179 (2014) 1–3.
- [16] S. I. Mussatto, L. F. Ballesteros, S. Martins, and J. A. Teixeira, *Industrial Waste*. InTech, 2012.
- [17] INETI - Avaliação do potencial de biomassa da região do Algarve. Relatório final. Maio 2006.
- [18] Ranta T. 2004. Logging residues from regeneration fellings for biofuel production — a GIS-based availability analysis in Finland. *Biomass Bioenergy* 28(3): 171-182 .
- [19] Centro de Biomassa para Energia (CBE), 2011. Biocombustíveis Sólidos no Mercado de Calor – Contexto Nacional. Workshop – Biocombustíveis sólidos – Produção, Qualidade e Utilização no Mercado de Calor.
- [20] Estratégia Nacional para as Florestas, RCM n.º 6-B/2015 - *Diário da República n.º 24/2015*, 1º Suplemento, Série I de 2015-02-04.
- [21] Caputo, A. C., Pelagagge, P.M., "RDF production plants: II Economics and profitability." *Applied Thermal Engineering* 22.4 (2002): 439-448.
- [22] U. Arena, “Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,” *Waste Management*, vol. 32, pp. 625-639, 2012.
- [23] U. Arena, “Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,” *Waste Management*, vol. 32, pp. 625-639, 2012.
- [24] E. Gomez, D. A. Rani, C. R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, and A. R. Boccaccini, “Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 161, no. 2–3, pp. 614–626, 2009.
- [25] Sanlisoy, A., Carpinlioglu, M.O., 2017. A review on plasma gasification for solid waste disposal. *International journal of hydrogen energy*, 42, 1361-1365.
- [26] Roth JR. *Industrial plasma engineering*. USA: Institute of Physics; 1994.
- [27] Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R, Mullen J,V,D. Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochim Acta*, 2002; 57: 609-58.
- [28] Gray L. Plasma gasification as a viable Waste-to-Energy treatment of municipal solid waste. Technical Report. USA: Solid and Hazardous Waste Prevention and Control Engineering; 2014.
- [29] Juniper, 2006. Plasma, Its Role in Waste Processing – a Decision Markets Guide.
- [30] J. G. Speight, *Gasification of Unconventional Feedstocks*. 2014.
- [31] Hlina M, Hrabovsky M, Kavka T, Konrad M, 2014. Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste. *Waste Manag*, 34, 63-6.

- [32] Lin K,C, Lin Y, Hsiao Y., 2014. Microwave plasma studies of Spirulina algae pyrolysis with relevance to hydrogen production. Energy; 64: 567-74.
- [33] Yoon S,J, Lee J., 2013. Hydrogen-rich syngas production through coal and charcoal gasification using microwave steam and air plasma torch. Int J Hydrogen Energ ; 37: 17093-100.
- [34] Sekiguchi H, Orimo T., 2004. Gasification of polyethylene using steam plasma generated by microwave discharge. Thin Solid Films; 457: 44-7.
- [35] P. Ruiz, A. Sgobbi, W. Nijs, C. Thiel, 2015. Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries. JRC Science for Policy Report, European Union, 2015.

#### > Incertezas técnico-científicas / riscos / desafios inerentes ao desenvolvimento do projeto

Um dos principais problemas inerentes a este projeto prende-se com o desenvolvimento de um sistema que permita gasificar mais do que um material. Como referido anteriormente, este projeto tem como objetivo desenvolver um sistema que promova a valorização de um conjunto diferenciado de lamas de depuração. Importa salientar que o sistema proposto irá funcionar satisfatoriamente no que diz respeito à estabilidade, a qualidade do gás, à eficiência e as perdas de pressão apenas dentro de determinados intervalos das propriedades do combustível, dos quais os mais importantes são: poder calorífico, teor de humidade, matéria volátil, composição e teor químico das cinzas, reatividade, tamanho, densidade, entre outros. De forma a minimizar esta incerteza o consórcio procederá a estudos compreensivos através da caracterização físico-química minuciosa dos resíduos em estudo bem como proceder a diversas simulações computacionais que permitam determinar quais as misturas de resíduos passíveis de serem gasificadas por plasma simultaneamente e quais as condições de operação. Porém poderão igualmente serem considerados resíduos não previstos em sede de candidatura e que permitam uma melhor homogeneidade do sistema.

Adicionalmente, a heterogeneidade dos materiais a gasificar levanta incertezas quanto à temperatura de gasificação e tempo de residência no gasificador. A composição de diferentes matérias-primas promovem variações na estequiometria da reação o que por sua vez acarreta alterações na quantidade do agente oxidante a introduzir, como na temperatura a que ocorre a reação de combustão parcial. Posto isto, após serem estudados e identificados os materiais a gasificar será necessário proceder a simulações dos processos termodinâmicos que ocorrem no gasificador.

Por outro lado, o reaproveitamento do gás de síntese também levanta incertezas. O consórcio definiu como objetivo o reaproveitamento do gás de síntese para fornecimento de energia ao sistema de forma a garantir a autossustentabilidade energética do processo e do sistema. Adicionalmente, prevê-se igualmente a utilização de energia calorífica obtida no permutador de arrefecimento do gás de síntese para a secagem dos resíduos. Caso não se verifique um equilíbrio energético positivo, a unidade poderá ser aquecida com fonte externa de outro biocombustível.

Outra incerteza prende-se com possibilidade de produção de compostos que podem provocar problemas ambientais resultante das características dos resíduos a processar, por isso torna necessário proceder ao estudo aprofundado da composição dos gases resultantes. Apesar de existirem métodos comprovados para a sua depuração, a heterogeneidade do material a gasificar poderá limitar a sua eficiência sendo necessário estudar a sua implementação e eficiência antes de se proceder a testes em condições reais.

No âmbito da limpeza de gases produzidos ao longo do processo de gasificação por plasma, a unidade proposta preconiza um estudo exaustivo sobre a limpeza do gás de síntese. De acordo com a solução proposta serão estudados os processos de passagem do gás por uma câmara de carvão ativado e carbonato de cálcio, lavador de gases, separador de mangas e separador ciclónico. Caso não sejam verificadas o cumprimento das especificações mínimas de utilização do gás de síntese, ou seja, os sistemas que serão desenvolvidos não apresentem potencial de descontaminação ou purificação do gás, será necessário utilizar soluções convencionais complementares, como é o caso, da utilização de resinas de troca iónica ou scrubbers. Desta forma, mitigar-se-á qualquer problema ambiental adjacente à emissão de gases ou poluentes.

Adicionalmente, serão igualmente introduzidas no sistema de gasificação por plasma proposto oxigénio proveniente da hidrólise do vapor de água resultante da secagem e do armazenamento do gás. O oxigénio será utilizado no sistema de gasificação como agente de oxidação com vista ao aumento do poder calorífico do gás de síntese produzido. No entanto, as necessidades da reação poderão ser superiores às quantidades produzidas no sistema de hidrólise do vapor de água proposto. Desta forma, como medida de contingência prevê-se a adição externa de oxigénio.

#### > Fundamentação das características inovadoras

Com base em todas as informações recolhidos e demonstradas anteriormente, é possível identificar as seguintes características inovadoras. Na seguinte tabela apresentam-se as principais características inovadoras da solução Plasma2Gas.

Características Inovadoras	Unidade de medida	Situação no Mercado	Objetivos do Projeto	Importância Relativa (%)
Transversalidade no tratamento de lamas de depuração	Fichas técnicas de Misturas de lamas de depuração otimizados	Não existente, pela análise da concorrência e do estado de arte foi identificado que as principais soluções de gasificação por plasma encontram-se otimizadas a resíduos específicos	Pretende-se desenvolver uma solução que permita a gasificação por plasma de lamas de depuração com diferentes origens e características	20
Otimização das condições operacionais de gasificação por plasma de lamas de depuração	Unidade de controlo	Não existente. No mercado existem solução de controlo e automação, mas não dedicada à gasificação de lamas de depuração	Consiste no Desenvolvimento de Software industrial de controlo de unidade mediante características de inputs	10
Produção de Energia Térmica e Elétrica	Protótipo desenvolvido	Pouco disseminada, a penetração de tecnologias de gaseificação no mercado energético	Desenvolvimento de uma tecnologia geradora de energia, autossustentável e ajustada à realidade nacional	20

Características Inovadoras	Unidade de medida	Situação no Mercado	Objetivos do Projeto	Importância Relativa (%)
		tem sido lento devido à necessidade de existir um fluxo de resíduos contínuo de forma a tornar estas tecnologia economicamente viável		
Redução do tempo de paragem para manutenções das tochas devido ao seu desgaste,	Protótipo desenvolvido	Não existente, pela análise da concorrência foi verificado que as concorrentes mundiais não utilizam a gasificação de plasma induzida por micro-ondas	Será desenvolvida uma tecnologia que não utiliza os elétrodos convencionais	20
Controlo e padronização das características do gás de síntese	Protótipo desenvolvido	Existente, mas pouco disseminada e não ajustada à gasificação por plasma de lamas de depuração	Através da introdução de diversas tecnologias de limpeza do gás de síntese formado	10
Diminuição do impacto ambiental do sistema	Equivalentes de CO <sub>2</sub> (Análise do ciclo de vida)	Embora já existam sistemas com baixas emissões de efluentes a reintrodução do gás de síntese no sistema a desenvolver não se encontra explorada comercialmente	Utilização do gás de síntese formado em motor para fornecimento de energia ao sistema. Adicionalmente, prevê-se igualmente a utilização de energia calorífica obtida no permutador de arrefecimento do gás de síntese para a secagem dos resíduos.	20