

# REVISTA

# IPT

Tecnologia  
e inovação

# 19

ipt<sup>®</sup>  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLOGICAS

Maio/2022



Foto: Usina Hidrelétrica Eng. Pedro Affonso Junqueira (Antas I), Poços de Caldas. Autor: Eduardo Luiz Machado

## TRIGERAÇÃO

Planta para produção de eletricidade, água quente e gelada atenderá ao setor industrial-farmacêutico

## SEMENTES PELOTIZADAS

Espécies vegetais selecionadas para recuperação de áreas degradadas por mineração

## NORMAABNT

Estudo sobre indicadores de abastecimento municipal de água



## REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.6, n.19, maio, 2022

Quadrimestral

### Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado

Andreia Longuinho da Silva

### Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado

Silas Derenzo

### Assistentes Editoriais

Augusto Max Colin

Bruno D. Francisco da Silva

Ester Garcia Ferreira da Silva

Hamilton Lelis Ito

João Antonio Rodrigues Garcia

Luiz Silviano

Silvia Megumi Mizoguti Padovani

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

## Créditos técnicos

DIAGRAMAÇÃO E ARTE:

Silvia Megumi Mizoguti Padovani

REVISÃO:

Eduardo Luiz Machado

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã  
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830

## Artigos técnicos

# SUMÁRIO

p.06

Aplicação da norma ABNT NBR ISO 37120/2021: estudo sobre indicadores de abastecimento de água no município de Guarulhos/SP

Autores: Danielly Arcini Souza, Omar Yazbek Bitar

p.25

Seleção de espécies vegetais para pelotização de sementes com aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração

Autores: Maria Lucia Solera, Mariana Hortelani Carnesecca Longo, Daphne Delduca Tonon, Caroline Almeida Souza

p.43

Estudo de viabilidade de cogeração a gás natural associada a resfriador de líquido por absorção e sistema fotovoltaico conectado à rede no setor industrial farmacêutico

Autores: Laércio Antônio Piva, Wagner Aldeia

p.67

Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de <sup>29</sup>Si no estado sólido na área de físico-química

Autores: Thiago Ricardo Santos Nobre, Martha González Pérez, Antoni Carlos Bloise Jr, Sérgio Cirelli Angulo, Shoko Ota, Valdecir Angelo Quarcioni

p.89

Medição da Composição dos "Gases" de Combustão.

Autor: Renato Vergnhanini Filho

## BATALHAS PELO CONHECIMENTO



**Eduardo Luiz Machado**  
Diretor Técnico em Ensino Tecnológico

A décima nona edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' coincide, infelizmente, com duas guerras que abalam o planeta. Uma é entre russos e ucranianos, outra é contra a pandemia da covid-19. Cada qual a seu modo impacta a vida de todos e, enquanto a primeira ainda segue rumos incertos, a segunda vai se encaminhando, esperançosamente, sob avanços da ciência. Conhecimento pode enfrentar guerras com chance de sucesso. A busca por ele é batalha diária que exige nossos melhores esforços. Hoje, nossa contribuição são cinco artigos técnicos capazes de induzir avanços nas respectivas áreas.

Abre esta edição a 'Aplicação da norma ABNT NBR ISO 37120/2021: estudo sobre indicadores de abastecimento de água no município de Guarulhos/SP'. Seus autores, Danielly Arcini Souza, do ENIAC/Guarulhos e Mestrado Habitação/IPT; e Omar Yazbek Bitar, da CIMA/IPT, sintetizam resultados do uso da norma.

"Seleção de espécies vegetais para pelotização de sementes com aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração" apresenta processo para uso de sementes em recuperação ambiental. A autoria é de Maria Lucia Solera, Mariana Hortelani Carneseca Longo e Caroline Almeida Souza, da CIMA/IPT; e Daphne Delduca Tonon, da FIPT.

Em "Estudo de viabilidade de cogeração a gás natural associada a resfriador de líquido por absorção e sistema fotovoltaico conectado à rede no setor industrial farmacêutico" avalia-se a viabilidade da trigeração de eletricidade, água gelada e água quente na indústria farmacêutica. São seus autores Laércio Antônio Piva, do Mestrado Processos Industriais/IPT; e Wagner Aldeia, do BIONANO/IPT.

No artigo "Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios-X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de  $^{29}\text{Si}$  no estado sólido" apresentam-se informações estruturais antes e após hidratação do cimento. Os autores são Thiago Ricardo Santos Nobre e Sérgio Cirelli Angulo, da POLI/USP; Martha González Pérez, do MA/IPT; Antoni Carlos Bloise Jr, do IF/USP; Shoko Ota, do BIONANO/IPT; e Valdecir Angelo Quarcioni, da HE/IPT.

Finaliza esta edição o artigo "Medição da Composição dos 'Gases' de Combustão", com instrumentos e métodos para medição dos componentes comuns nos gases de combustão industrial que podem impactar a produção e o ambiente. Seu autor é Renato Verghnanini Filho, da EN/IPT.

Boa leitura!

## Artigo técnico

## Aplicação da norma ABNT NBR ISO 37120/2021: estudo sobre indicadores de abastecimento de água no município de Guarulhos/SP

*Application of ABNT NBR ISO 37120/2021: study on water supply indicators in the city of Guarulhos/SP*

Danielly Arcini Souza <sup>ab\*</sup>, Omar Yazbek Bitar <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT - São Paulo/SP.

<sup>b</sup> Centro Universitário ENIAC – Guarulhos/SP.

<sup>c</sup> Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas / Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT - São Paulo/SP.

\* E-mail: danielly.arcini@gmail.com

Palavras-chave: Abastecimento de água; Guarulhos/SP; Norma ABNT; Sustentabilidade urbana.

*Keywords: Water supply; Guarulhos/SP; ABNT standard; Urban sustainability.*

## Resumo

Este artigo sintetiza resultados de um estudo de aplicação da Norma "ABNT NBR ISO 37120:2021 – Cidades e comunidades sustentáveis – Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida", tendo em vista o caso do município de Guarulhos/SP. O trabalho focaliza especificamente o item 23 da Norma, relacionado aos serviços de abastecimento de água. Os resultados do estudo mostram a possibilidade de obtenção de dados referentes aos indicadores propostos na Norma em sistemas de informações oficiais, tanto em relação aos quatro indicadores classificados como essenciais quanto aos três indicadores considerados de apoio. Apresenta-se a discussão realizada com base nos dados obtidos, em vista da finalidade de subsidiar o acompanhamento e a evolução dos serviços prestados, salientando-se os que se referem à regularidade no abastecimento de água à população da cidade e às condições da rede de infraestrutura disponível. Nas conclusões, destaca-se o potencial da Norma no sentido de contribuir para a obtenção de um panorama sucinto sobre o tema na cidade e, desse modo, auxiliar no processo de tomada de decisões acerca da priorização de ações a executar para a melhoria contínua dos serviços prestados.

## Abstract

*This article summarizes the results of an application study of the "ABNT NBR ISO 37120:2021 – Sustainable Cities and Communities – Indicators for urban services and quality of life", considering the case of the municipality of Guarulhos/SP. The work specifically focuses on item 23 of the Standard, related to water supply services. The results of the study show the possibility of obtaining data referring to the indicators proposed in the Standard in official information systems, both about the four indicators classified as essential and the three indicators considered to be of support. The discussion carried out based on the data obtained is presented, given the purpose of subsidizing the monitoring and evolution of the services provided, highlighting those that refer to the regularity in the supply of water to the population of the city and the conditions of the network of available infrastructure. In the conclusions, the potential of Norma is highlighted in the sense of contributing to obtaining a succinct overview of the subject in the city and, in this way, assisting in the decision-making process regarding the prioritization of actions to be carried out for the continuous improvement of the services provided.*

## 1 Introdução

Diretrizes estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) definem "cidade sustentável" como um lugar onde os avanços pretendidos em relação ao desenvolvimento social, econômico e ambiental sejam não apenas eficazes, mas também duradouros. Entre outros requisitos a atender, uma cidade sustentável deve assegurar, igualmente ao longo do tempo, uma proteção quanto aos riscos ambientais que possam surgir em face de ameaças ao desenvolvimento, o que inclui equacionar a questão do acesso aos recursos hídricos nas cidades (BRASIL, 2015).

Nesse contexto, salienta-se a importância de acompanhar a evolução das ações básicas relacionadas à sustentabilidade nas cidades, utilizando-se indicadores que possam contribuir para uma avaliação objetiva acerca da qualidade de vida de suas populações. Considera-se que uma estrutura nacional e regional bem organizada tende a aumentar a capacidade de fornecer serviços e recursos de maneira adequada, mas para isso é necessário contar com um quadro consistente de dados e informações que propiciem acompanhar os avanços efetivos e as dificuldades a superar, tendo-se em conta a consideração de que cidades prósperas devem constituir um ambiente saudável para a interação humana (JACOBI, 2003). Ademais, os indicadores urbanos devem oferecer um panorama sobre a qualidade de vida nas cidades, para determinar as variações intraurbanas e apontar os setores que devem exigir maior atenção por parte dos formuladores e executores de políticas públicas (SANTOS, 2009).

A proposição e o desenvolvimento de sistemas de indicadores de sustentabilidade urbana surgem nesse âmbito, de modo a auxiliar no acompanhamento das atividades empreendidas em prol da melhoria da qualidade de vida nas cidades e dos resultados obtidos em relação aos variados temas envolvidos. Os indicadores visam auxiliar a gestão pública dos municípios, com o objetivo de aferir os serviços que são prestados à população e, enfim, propiciar o acompanhamento dessas atividades e verificar o alcance em relação a uma melhor qualidade de vida para todos (SOUZA, 2019).

Dentre os sistemas de indicadores que vêm sendo propostos desde o final do século passado por diferentes organizações com atuação global ou regional, notam-se, em anos relativamente mais recentes, os que se referem ao universo da normalização técnica, entre os quais podem ser destacados, pelo caráter pioneiro e de integração, os que advêm da norma internacional ISO 37120:2018, editada inicialmente em 2014 pela *International Organization for Standardization* (ISO). A primeira versão brasileira correspondente a essa norma internacional foi publicada em 2017, sendo posteriormente atualizada pela norma ABNT NBR ISO 37120:2021 – Cidades e comunidades sustentáveis: indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida (ABNT, 2021).

Nessa última edição brasileira, considerou-se também a atualização da norma internacional efetuada em 2018, abrangendo os principais setores e serviços públicos que devem ser contemplados pelos sistemas de gestão municipal, destacando-se 19 temas: economia, educação, energia, meio ambiente e mudanças climáticas, finanças, governança, saúde, habitação, população e condições sociais, recreação, segurança, resíduos sólidos, esporte e cultura, telecomunicação, transporte, agricultura local/urbana e segurança alimentar, planejamento urbano, esgotos e água (ABNT, 2021).

Este artigo sintetiza resultados de um estudo de aplicação do item 23 da Norma, acerca do tema "Água", ao caso do município de Guarulhos/SP, buscando-se contribuir ao desenvolvimento das práticas de levantamento e uso de informação apropriada para a aferição de avanços e a identificação de dificuldades a equacionar ante o desafio da sustentabilidade nas cidades. O estudo realizado se insere, ainda, no processo de reconhecimento de instrumentos que possam facilitar a comunicação no processo de construção de uma cidade mais comprometida com a transparência em relação às informações sobre sustentabilidade urbana (SOUZA, 2019).

## 2 Objetivos e métodos

O objetivo geral do estudo realizado é o de aplicar o item 23 "Água" da norma ABNT NBR ISO 37120:2021, que se refere a questões relacionadas à oferta e consumo de água nas cidades, tendo em vista o caso do município de Guarulhos/SP. Os objetivos específicos compreenderam: distinguir os indicadores es-

senciais e os indicadores de apoio contidos na Norma a respeito do tema e passíveis de aplicação ao estudo de caso; obter os dados correspondentes a esses indicadores em bases de informações oficiais; e verificar, ainda que em caráter parcial e limitado, dado o foco restrito aos serviços de abastecimento de água, a situação evolutiva do município em relação à perspectiva de desenvolvimento sustentável.

Para realização do estudo, procedeu-se inicialmente a uma análise detalhada dos indicadores contidos no referido item 23 da Norma sobre "Água", bem como a busca de dados correspondentes em páginas da internet e em documentos disponibilizados por órgãos oficiais. Reuniões e contatos com técnicos da administração municipal também foram efetuados para esclarecimentos e obtenção de informações. Os dados levantados e selecionados foram principalmente os do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional (SNIS/MDR) e os da Prefeitura Municipal de Guarulhos/SP (PMG/SP). Os dados específicos se apresentam geralmente em formatos desagregados, não necessitando de cálculos e tampouco tratamentos estatísticos para sua utilização nas análises e discussões realizadas. Os valores coletados correspondem aos anos de 2015 e 2019, para os efeitos de comparação e análise evolutiva a realizar na aplicação, com base nos indicadores da Norma.

Outras fontes identificadas, as quais contêm informações sobre o contexto mais geral em que se situa o serviço de abastecimento de água na cidade de Guarulhos/SP, correspondem ao Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) e ao Plano Diretor Municipal (PDM). O PMSB contempla, de maneira abrangente, a tipologia de serviços de abastecimento de água que devem ser prestados à população, sendo importante para o conhecimento das demandas a atender. A consulta ao PDM, dentre outros instrumentos de planejamento territorial, foi realizada de modo a verificar aspectos mais amplos, referentes a princípios e regras gerais estabelecidos ao ordenamento da ocupação do espaço da cidade, particularmente no que tange à questão dos indicadores relativos à conservação de recursos ambientais e mananciais hídricos (SOUZA, 2019).

Buscou-se, enfim, com base nos indicadores propostos no item 23 da Norma, avaliar de maneira sucinta o desempenho dos serviços públicos de abastecimento de água prestados e as condições relacionadas à rede de infraestrutura correspondente disponível no município de Guarulhos/SP.

### 3 Resultados e discussão

Apresenta-se, a seguir, uma síntese dos resultados obtidos em vista da aplicação do item 23 da norma ABNT NBR ISO 37120:2021 ao caso do município de Guarulhos/SP, a respeito do tema "Água", discutindo-os quanto aos indicadores e respectivos dados levantados, bem como em relação aos aspectos referentes à regularidade no abastecimento de água à população e às condições da infraestrutura disponível.

### 3.1 Aspectos gerais da Norma aplicada

A norma ABNT NBR ISO 37120:2021, denominada "Cidades e comunidades sustentáveis: indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida" (ABNT, 2021), tem como escopo a definição e o estabelecimento de métodos para aplicação de um conjunto de indicadores que buscam auxiliar a mensuração do desempenho dos serviços prestados à população e avaliar a qualidade de vida nesse contexto. Para tanto, dada a abrangência de temas contemplados, a Norma considera os princípios estabelecidos em outras normas técnicas correlatas, que podem ser aplicadas conjuntamente.

A Norma contempla 19 temas, explicitados entre os itens 5 e 23, que abrangem a variedade de questões a considerar nas cidades, há um conjunto de informações que visam orientar acerca dos indicadores e respectivos dados a obter, compreendendo: generalidades, onde se destaca que as aplicações devem reportar se determinado indicador está consoante às finalidades pretendidas; requisitos, que envolve a base de conhecimento determinada em fórmulas a ser aplicada para cada tema; fonte dos dados, geralmente para se referir à priorização da busca de dados disponíveis em órgãos reguladores, escritórios de gestores municipais, dentre outros de alcance público; e interpretação dos dados obtidos, para verificar se estes são adequados e podem ou não ser correlacionados. Há, ainda, um item final sobre a importância da elaboração de relatório e da manutenção de registros, que devem refletir a compilação sistemática dos resultados, segundo os dados requeridos nos métodos recomendados (ABNT, 2021).

Para aplicação da Norma em seu conjunto é necessário o acesso a bases de dados de diferentes sistemas de informações públicas e em variados campos do conhecimento e de gestão de cidades. Na sequência, conforme os objetivos propostos no estudo realizado, sintetizam-se as análises efetuadas a respeito da aplicação do item 23 "Água" da Norma para o município de Guarulhos/SP.

### 3.2 Indicadores e dados obtidos a respeito do item 23 "Água" da Norma

A Norma apresenta duas categorias de indicadores, para os distintos temas nela abordados: os essenciais e os de apoio. No **Quadro 1** constam os quatro indicadores essenciais e os três indicadores de apoio referentes ao item 23 "Água" da Norma. No **Quadro 2** pode ser observada a correlação entre os indicadores considerados na Norma e os indicadores do SNIS/MDR e da PMG/SP.

**Quadro 1 – Indicadores do item 23 “Água” da norma ABNT NBR ISO 37120:2021 e o tipo correspondente**

Tema	Subitem	Indicador	Tipo
Água (Item 23)	23.1	Porcentagem da população da cidade com serviço de abastecimento de água potável (%)	Indicador Essencial (E)
	23.2	Porcentagem da população da cidade com acesso sustentável a uma fonte de água adequada para o consumo (%)	
	23.3	Consumo doméstico total de água <i>per capita</i> (litros/dia)	
	23.4	Taxa de conformidade de qualidade da água potável (%)	
	23.5	Consumo total de água <i>per capita</i> (litros/dia)	Indicador de Apoio (A)
	23.6	Duração média de interrupção do abastecimento de água, em horas por domicílio por ano (h/domicílio/ano)	
	23.7	Porcentagem de perdas de água (água não faturada - %)	

Fonte: adaptado de ABNT (2021).

**Quadro 2 – Correspondência dos indicadores contidos no item 23 “Água” da norma ABNT NBR ISO 37120:2021 com outros encontrados no SNIS/MDR e na PMG/SP, em relação à cidade de Guarulhos/SP.**

Indicador do item 23 “Água” da Norma	Indicador correspondente no SNIS/MDR	Indicador correspondente na PMG/SP
23.1 – Porcentagem da população da cidade com serviço de abastecimento de água potável (%)	IN023 – Índice de atendimento urbano de água	GR_IC01 – Índice de cobertura de abastecimento de água
23.2 – Porcentagem da população da cidade com acesso sustentável a uma fonte de água adequada para o consumo (%)		
23.3 – Consumo doméstico total de água <i>per capita</i> (litros/dia)	IN022 – Consumo médio <i>per capita</i> de água	-
23.4 – Taxa de conformidade de qualidade da água potável (%)	IN079 e IN080 – Índice de conformidade da qualidade de amostras (cloro e turbidez, respectivamente)	-

Indicador do item 23 "Água" da Norma	Indicador correspondente no SNIS/MDR	Indicador correspondente na PMG/SP
23.5 – Consumo total de água <i>per capita</i> (litros/dia)	IN053 – Consumo médio de água por economia	GR_IC01 – Índice de cobertura de abastecimento de água
23.6 – Duração média de interrupção do abastecimento de água, em horas por domicílio por ano (h/domicílio/ano)	IN072 – Duração média das paralisações	GR_OP01 – Índice de perdas de água por ramal; e GR_QS04 – Índice de paralisações no abastecimento
23.7 – Porcentagem de perdas de água (água não faturada - %)	IN049 – Índice de perdas na distribuição	GR_OP02 – Índice de perdas na distribuição

Fonte: ABNT (2021); SNIS/MDR (2015; 2019); Guarulhos (2020).

Evidencia-se, no **Quadro 2**, que os indicadores do SNIS/MDR mostram boa correlação ao conjunto de indicadores sobre "Água" da Norma, enquanto os da PMG/SP revelam uma correspondência parcial. Não obstante, os dados desses dois sistemas das esferas nacional e municipal do poder público mostram potencial para aplicação da Norma.

Na **Tabela 1**, apresentam-se os dados em relação aos anos de 2015 e 2019. Dados adicionais sobre os indicadores e informações desagregadas para os mesmos anos estão apresentados na **Tabela 2**. De modo geral, uma primeira observação a registrar é a de que foi possível obter dados em sistemas oficiais para todos os indicadores presentes no item 23 da Norma.

Tabela 1– Dados sobre os indicadores essenciais (E) e de apoio (A) contidos no item 23 "Água" da norma ABNT NBR ISO 37120:2021, conforme obtidos em relação aos serviços de água na cidade de Guarulhos/SP.

Subitem	Tipo	Indicador	Valor	
			2015	2019
23.1	E	Porcentagem da população da cidade com serviço de abastecimento de água potável (%)	99,8	96,2
23.2	E	Porcentagem da população da cidade com acesso sustentável a uma fonte de água adequada para o consumo (%)	99,8	96,2
23.3	E	Consumo doméstico total de água <i>per capita</i> (litros/dia)	12,9	10,9
23.4	E	Taxa de conformidade de qualidade da água potável (%)	123,3 <sup>1</sup>	99,8
23.5	A	Consumo total de água <i>per capita</i> (litros/dia)	136,2	124,9
23.6	A	Duração média de interrupção do abastecimento de água, em horas por domicílio por ano (h/domicílio/ano)	9,6	13,06
23.7	A	Porcentagem de perdas de água (água não faturada - %)	29,4	52,7

Fonte: SNIS/MDR (2015; 2019); Guarulhos (2020).

<sup>1</sup> Índice com porcentagem acima de 100 devido ao cálculo determinado pelo SNIS, que segue:  $QD006 / QD20 \times 100$ . O primeiro corresponde à Quantidade de Amostras para o Cloro Residual (analisadas) (19.542 amostras); o segundo corresponde à Quantidade Mínima de Amostras para Cloro Residual (obrigatória) (15.857 amostras). Entende-se nesse cálculo que a porcentagem acima de 100 é o número de amostras realizadas a mais em relação à quantidade mínima obrigatória.

Tabela 2<sup>2</sup> – Dados e informações desagregadas obtidos em relação aos serviços de água na cidade de Guarulhos/SP, passíveis de uso na aplicação do item 23 "Água" da norma ABNT NBR ISO 37120:2021.

Código*	Descrição	Valor estimado	
		2015	2019
IN022	Consumo médio <i>per capita</i> de água	136,2	124,9
IN023	Índice de atendimento urbano de água	99,8	96,2
IN049	Índice de perdas na distribuição	29,4	52,7
IN053	Consumo médio de água por economia	12,9	10,9
IN072	Duração média das paralisações	9,6	13,06
IN079	Índice de conformidade da qualidade de amostras - cloro residual	123,3	99,8
IN080	Índice de conformidade da qualidade de amostras - turbidez	135,4 <sup>3</sup>	99,9

\*Os indicadores correspondem às seguintes especificações de unidades de medição: IN022: litros/hab./dia; IN023, IN049, IN079 e IN080: percentual; IN053: m3/mês/economia ou setor econômico; IN072: horas. IN corresponde a abreviação da palavra "indicador".

Fonte: adaptado de SNIS/MDR (201; 2 019).

Com base nos indicadores da Norma apresentados no **Quadro 1**, assim como os respectivos dados levantados para o estudo contidos na **Tabela 1** e **Tabela 2**, correlacionados com o **Quadro 2**, seguem-se as considerações gerais efetuadas.

Em relação ao indicador do Subitem 23.1 – "Porcentagem da população da cidade com serviço de abastecimento de água potável", esse indicador mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR contidos no "IN023 – Índice de atendimento urbano de água". Pode-se considerar, adicionalmente, a partir de informações obtidas com o corpo técnico do Município, que a concessionária atualmente responsável pelos serviços, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), vêm investindo em obras de melhoria no abastecimento. Porém, no comparativo dos anos 2015 e 2019, há uma diferença nos números, ainda que possa ser caracterizada como pequena. O primeiro mostra atendimento de 99,8% da população com abastecimento de água potável; o segundo, 96,2%. No estudo, não foi possível decifrar a razão dessa redução, mas presume-se que esteja relacionada com a forma como a concessionária verifica e registra os dados. Como visto, em 2019, o monitoramento apontou 96,2% da população atendida com o serviço de abastecimento de água

<sup>2</sup> Tabela com informações do SNIS/MDR usada para mostrar os códigos de pesquisa, descrição e para complementar a Tabela 2.

<sup>3</sup> Conforme comentário anterior, o mesmo acontece nesse índice baseado na fórmula:  $QD008 / QD019 \times 100$ . O primeiro corresponde à Quantidade de Amostras para Turbidez (analisadas) (16.971 amostras); o segundo corresponde à Quantidade Mínima de Amostras para Turbidez (obrigatória) (12.528 amostras). Entende-se nesse cálculo que a porcentagem acima de 100 é o número de amostras feitas a mais em relação a quantidade mínima obrigatória.

potável. Contudo, notou-se que as obras de melhoria foram demandadas também no sentido de marcar o fim do rodízio de água e as ações estão focadas no Programa de Redução de Perdas, bem como para o aumento no atendimento do serviço aos cidadãos guarulhenses (SNIS/MDR, 2015; 2019; SABESP, 2020a).

No Plano Diretor do Sistema de Abastecimento (PDSA) da cidade de Guarulhos/SP consta uma meta de ampliação e melhorias do serviço de abastecimento (GUARULHOS, 2019b). Esse indicador do Subitem 23.1 se refere somente ao abastecimento de água por tubulação, ou seja, pela rede de abastecimento, enquanto o indicador do Subitem 23.2 – “Porcentagem da população da cidade com acesso sustentável a uma fonte de água adequada para consumo” inclui tipos adicionais de fornecimento, como nascentes, poços e outras formas de captação e distribuição de água. Esse último indicador mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR contido no “IN023 – Índice de atendimento urbano de água”. A quantidade de população atendida pelo serviço de abastecimento especificado por esse indicador em 2015 era de 99,8% e em 2019 era de 96,2%, salvo que esses são indicadores quantitativos e que não se considera a qualidade da água fornecida (SNIS/MDR, 2015; 2019). Como observado anteriormente, não há uma explicação sobre a diferença menor da porcentagem para o ano de 2019. Cabe citar que a revisão da Norma (ABNT, 2021) prevê um indicador referente à taxa de conformidade da qualidade e potabilidade da água (Subitem 23.4, conforme tratado mais adiante neste artigo).

Em relação ao indicador do Subitem 23.3 – “Consumo doméstico total de água *per capita* (litros/dia)”, que mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR “IN053 – Consumo médio de água por economia” e ao indicador do Subitem 23.5 – “Consumo total de água *per capita* (litros/dia)”, que mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR “IN022 – Consumo médio *per capita* de água”, a Norma define que a população urbana a ser considerada na divisão é a população urbana total, ao passo que a definição do SNIS/MDR considera somente a população atendida com abastecimento de água. Os valores tendem a divergir, dado que pode haver uma parcela da população não atendida. Para esses indicadores, a tendência favorável é a de redução, mas um valor muito reduzido pode esconder um baixo consumo devido à escassez de água. Em relação a Guarulhos/SP, em 2015 o consumo médio mensal de água por economia era de 12,9 m<sup>3</sup>; em 2019 esse consumo caiu para 10,9 m<sup>3</sup>. Deve-se essa diminuição ao cenário de estiagem no Estado e à consequente redução no fornecimento de água (GUARULHOS, 2019b; SNIS/MDR, 2015; 2019).

Para o indicador do Subitem 23.4 – “Taxa de conformidade de qualidade da água potável”, que mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR “IN079 – Índice de conformidade da qualidade de amostras – Cloro” e o “IN080 – Índice de conformidade da qualidade de amostras – Turbidez”, segundo o Relatório de Sustentabilidade da concessionária Sabesp, nota-se que o controle das condições de potabilidade é efetuado desde os pontos de captação, passando pelo tratamento nas 253 estações e distribuição aos consumidores finais. Em 2015, o SNIS/MDR mostra o valor de 123,3% de taxa de conformidade de qualidade, com números fornecidos pela concessionária anterior à Sabesp, o Serviço de Abastecimento e Água e Esgoto (SAAE). Em 2019, nos laboratórios de controle sanitário da concessionária atual, realizaram-se mensalmente cerca de 90 tipos de testes e mais de 90

mil análises que aferiram parâmetros de turbidez, cor, cloro, coliformes totais, metais, agrotóxicos, dentre outros (SABESP, 2020b). De acordo com os números do SNIS/MDR, o índice de conformidade de qualidade da água foi de 99,81% para cloro e 99,92% para turbidez, o que mostra o elevado grau de adequação desses parâmetros na água fornecida (SNIS/MDR, 2015; 2019).

O indicador do Subitem 23.6 – “Duração média de interrupção do abastecimento de água, em horas por domicílio por ano”, que mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR “IN072 – Duração média das paralisações” está longe de ser atendido. A quantidade de horas de interrupção dos serviços de fornecimento de água em Guarulhos/SP, em 2015 era de 9,6 horas; em 2019 era de 13,06 horas (SNIS/MDR, 2015; 2019); um pequeno aumento, mas que atinge toda a população guarulhense. Deve-se creditar esse aumento pelo cenário de estiagem no Estado, afetando o abastecimento. Contudo, tal número deve ser menor ao número monitorado ou igual a zero, para atender aos outros indicadores de saneamento de forma completa (ABNT, 2021).

Quanto ao indicador do Subitem 23.7 – “Porcentagem de perdas de água (água não faturada)”, que mostra correspondência com o indicador do SNIS/MDR “IN049 – Índice de perdas na distribuição”, em 2015 as perdas chegaram a 29,4%. Com a chegada da Sabesp em Guarulhos/SP, que monitora com frequência as perdas desde 2019, houve um aumento que chegou a 52,7% na distribuição. Segundo a companhia, novas tecnologias de aferição foram implantadas na cidade, justificando o aumento no número, visto que tais verificações se tornaram mais abrangentes. Outro fator que auxilia na melhor adequação das perdas verificadas no serviço de abastecimento de água está ligada à regularização da infraestrutura hidráulica e na redução da pressão nas tubulações. Essa redução é baseada em uma tecnologia usada mundialmente onde o controle é realizado 24 horas e intensificado a noite, período em que há menor consumo de água. Tal procedimento visa o combate às perdas por vazamentos e rompimentos na tubulação, objetos de significativos esforços da administração da companhia que já aplicava o procedimento em diversas cidades da Região Metropolitana de São Paulo e que em 2019 começou a ser realizado em Guarulhos/SP, produzindo sensíveis avanços (SABESP, 2021).

Em 2008, o PDSA apresentava as projeções com prioridades e diretrizes para a implantação de um sistema eficiente nos serviços de distribuição de água, com o objetivo de: formular estratégias integradas para melhor aproveitamento dos recursos hídricos da região; planejar adequadamente a produção, o recebimento e a distribuição da água para que toda a população da cidade fosse atendida; planejar as ações visando garantir a qualidade no abastecimento público de água; definir as etapas de obras e as prioridades; e atender às diretrizes legais e institucionais e aos aspectos da viabilidade econômica, financeira e ambiental nas propostas de intervenção.

As etapas contidas no PDSA encontram-se organizadas em três partes: imediata, até o final do ano de 2008; primeira, até o ano de 2015; e segunda, até o ano de 2025. No PDSA foram estabelecidos valores para a época de sua formulação (2002) e valores futuros utilizados para a definição e o planejamento das intervenções necessárias (2025). Assim, as demandas estabelecidas para o atendimento da população foram feitas em quota *per capita*, estabelecidas em função dos critérios e parâmetros

adotados ao longo do projeto. Contudo, o estudo realizado para a elaboração do PDSA previu que a oferta se mostrava inferior às necessidades, conforme mostra a **Tabela 3**.

**Tabela 3 – Definição das demandas (m<sup>3</sup>/ s) período de 2002 a 2025.**

Oferta x Demanda	Inicial			Futura
	Ano de referência	2002	2008	2015
Demanda	4,3	4,7	5,0	5,3
Produção	3,7	4,3 (2019)		

**Fonte: adaptado de Guarulhos/SP (2018) e ANA (2019).**

Embora o serviço de abastecimento apresentasse uma infraestrutura relativamente adequada, esta supriu tecnicamente apenas as necessidades da etapa imediata (2008). Para a primeira etapa (ano 2015), observou-se que a questão do equilíbrio entre a oferta e a demanda não foi um item solucionado. Como condição futura, visto que a produção ainda era baixa para atender a demanda, conforme se observa na **Tabela 4**, os investimentos foram continuados para melhorias da produção com vistas à complementação da adequação da infraestrutura e ao atendimento da demanda até o horizonte do projeto (ano de 2025) (GUARULHOS, 2018).

A esse levantamento, pode-se se associar os subitens 23.3 e 23.5 da Norma, que tratam do consumo doméstico diário e o consumo *per capita*. Para suprir a demanda do consumo de água, há um planejamento de médio e longo prazo para melhorias no índice de perdas e atendimento à quota *per capita* devido à evolução populacional. Assim, para o efetivo cumprimento das metas estabelecidas no plano de obras, deve-se garantir a implementação da infraestrutura adequada à produção e à distribuição do volume de água tratada necessária ao atendimento da demanda do município (SABESP, 2020b). Na **Tabela 4** é apresentada uma previsão de evolução no índice de atendimento no abastecimento de água, que cumprirá o que determina o PDSA (GUARULHOS, 2018).

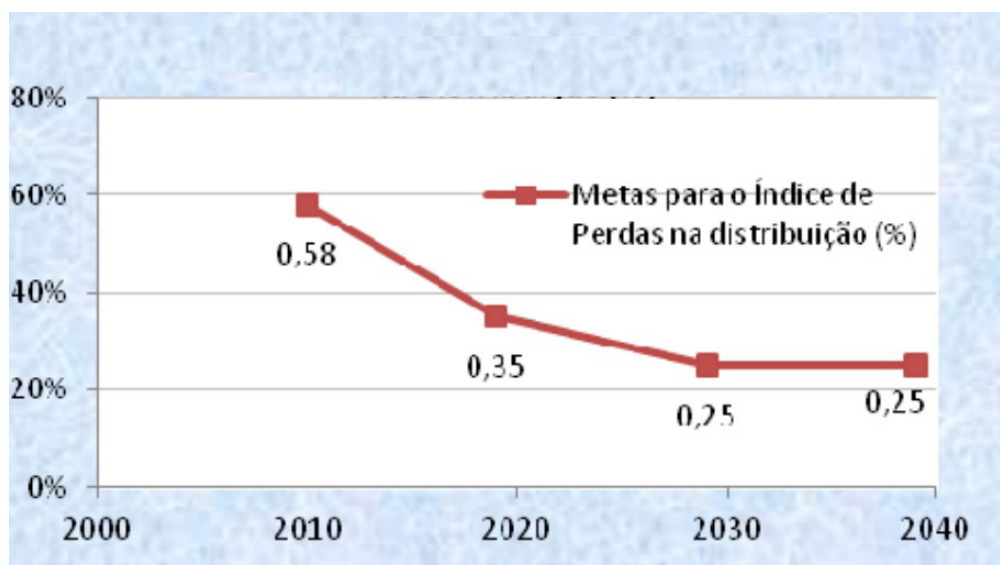
**Tabela 4 – Índice de atendimento nos serviços de abastecimento de água.**

Índice de abastecimento em porcentagem (%)				
Ano	2010	2019	2029	2039
Índice	93	100	100	100

**Fonte: Guarulhos (2018).**

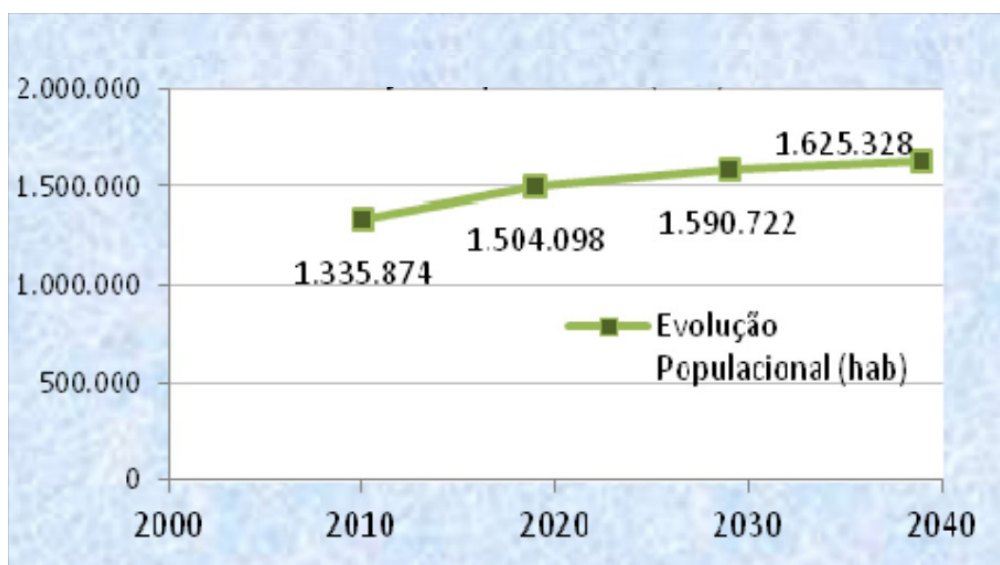
Os principais parâmetros que embasam o cálculo da demanda de água para o atendimento da demanda projetada para os anos apresentados, na **Tabela 5**, são o crescimento populacional, a evolução da quota *per capita* ofertada à comunidade e o índice global de perdas de água, acrescido dos usos sociais, conforme apresentados da **Figura 1** à **Figura 3**.

**Figura 1** – Metas para o índice de perdas na distribuição (%).



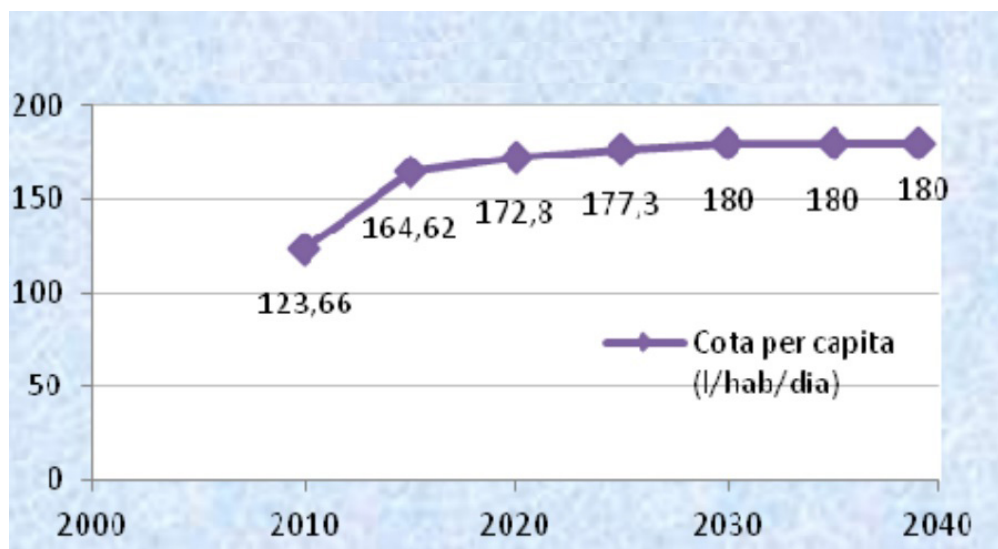
Fonte: Guarulhos (2018).

**Figura 2** – Evolução Populacional (hab).



Fonte: Guarulhos (2018).

Figura 3 – Quota *per capita* (/hab /dia).



Fonte: Guarulhos (2018).

Nos gráficos apresentados é possível notar que, apesar do crescimento da população e da oferta de água por habitante, o incremento da demanda não deverá ser expressivo se as metas estabelecidas para o índice de perdas puderem ser alcançadas. A esses dados se podem associar também os subitens 23.1, 23.2 e 23.7 da Norma.

### 3.3 Regularidade no abastecimento de água

A questão do abastecimento de água na cidade de Guarulhos/SP carecia de uma regularidade que proporcionasse conforto e segurança aos seus usuários, uma vez que o não fornecimento de água de forma contínua se mostrava associado, principalmente, ao desequilíbrio entre a oferta e a demanda. O índice de perdas de água, ainda acima do desejável para uma região considerada como de escassez hídrica, com a oferta de água à população (124,9 litros por habitante por dia) e o índice de cobertura de abastecimento de água (aproximadamente 96,2%), mostram aspectos que precisam ser cuidados, por mais que o fornecimento de água esteja atingido em quase sua totalidade, além da quantidade de horas de interrupção dos serviços, em que o índice deve ser menor que o atual (13,06 horas) ou igual a zero (GUARULHOS, 2020).

Os dados obtidos a respeito dos indicadores mostram que os principais problemas para atingir a universalização dos serviços estão relacionados à insuficiência de recursos hídricos próprios, à infraestrutura hidráulica ainda inadequada e à necessidade de melhor adequação das perdas verificadas no serviço de abastecimento de água (SABESP, 2021). Enquanto a regularização

da infraestrutura hidráulica e o combate às perdas, objetos de significativos esforços da concessionária Sabesp, têm mostrado sensíveis avanços, anteriormente o aumento da produção de água esbarrava no limitado potencial existente para aproveitamento dos recursos hídricos próprios, levando o operador anterior, o Serviço Autônomo de Água e Esgotos (SAAE), à dependência de compra de água no atacado da própria Sabesp (SAAE, 2019).

Contudo, ainda que os indicadores evidenciem o avanço no rumo da universalização, considera-se necessário que o município busque incessantemente o aumento de sua produção própria, por meio de um melhor aproveitamento e gestão de mananciais hídricos existentes em seu território e, ainda, dê continuidade à promoção do uso eficiente dos recursos disponibilizados ao abastecimento.

### 3.4 Infraestrutura de abastecimento

A avaliação do desempenho pode ser caracterizada como uma ferramenta de gestão que propicia comparar o andamento de um determinado processo em vista de uma ou mais referências. A medida do desempenho é geralmente efetuada por meio da apuração de indicadores. As referências tendem a ser estabelecidas com base em metas e padrões de serviço. Os resultados obtidos são interpretados com base na comparação entre os valores apurados e suas aproximações a metas e padrões de serviço estabelecidos. Toda não conformidade observada deve gerar propostas de correção de rumo e o estabelecimento de compromissos com os responsáveis para a melhoria contínua do processo analisado. Para isso foram propostos pela PMG/SP (GUARULHOS, 2018), sete indicadores e suas correspondentes metas e padrões de serviço, conforme **Tabela 5**, os quais também puderam ser utilizados como referência nas análises relativas ao uso da Norma (SOUZA, 2019).

**Tabela 5 – Indicadores de infraestrutura e cobertura de serviços, conforme o planejamento municipal.**

Código	Indicador	Unidade	Metas e padrões de serviço		
			Curto prazo (2010/2019)	Médio prazo (2020/2029)	Longo prazo (2030/2039)
GR_OP01	Índice de perdas de água por ramal	Litros por ramal por dia	427	143	143
GR_OP02	Índice de perdas na distribuição	%	35	25	25
GR_QS04	Índice de paralisações no abastecimento	Economias por paralisação (litros)	48.000	32.000	16.000
GR_IC01	Índice de cobertura de abastecimento de água	%	94	96	99

Fonte: Guarulhos (2018).

Esses indicadores de infraestrutura e cobertura de serviços da PMG/SP podem se associar aos subitens do item 23 da Norma. Em relação ao "GR\_OP01 – Índice de perdas de água por ramal" e "GR\_OP02 – Índice de perdas na distribuição" eles corroboram o Subitem 23.7 "Porcentagem de perdas de água (água não faturada)". O índice do primeiro é indicado em litros por ramal, por dia; o segundo em porcentagem, facilitando a verificação das informações coletadas. O índice estimado pela PMG/SP até o ano de 2019 era de 35% de perda. Contudo, pelo levantamento feito no SNIS/MDR, o índice de perdas para a cidade tange 52,7%, estando acima da meta estabelecida para o período de médio prazo (2020/2029). Ao mesmo tempo, tem-se que a Sabesp vêm trabalhando continuamente na redução de perdas, para que as metas de médio e longo prazo sejam atingidas (SABESP, 2020b).

Ao índice "GR\_QS04 – Índice de paralisações no abastecimento", associa-se o Subitem 23.6 "Duração média de interrupção do abastecimento de água, em horas por domicílio por ano", mesmo que com diferenças em suas medições. O índice tem uma definição de litros de água não fornecidos durante a paralisação do abastecimento, enquanto o subitem da Norma refere-se à quantidade de horas de interrupção e não ao montante de água, mas que também se associa às paralisações no abastecimento.

Ao índice "GR\_IC01 – Índice de cobertura de abastecimento de água", associa-se os subitens 23.1 "Porcentagem da população da cidade com serviço de abastecimento de água potável" e 23.2 "Porcentagem da população da cidade com acesso sustentável a uma fonte de água adequada para consumo". O índice de médio prazo era 96% de cobertura de serviços de abastecimento a partir do ano de 2020 até 2029, número esse atingido em 2019, segundo levantamento informado ao SNIS/MDR, o de 96,2%.

### 3.5 Considerações finais

De todo modo, deve-se registrar os esforços efetuados nas duas últimas décadas no sentido de universalizar os serviços de abastecimento de água à população na cidade de Guarulhos (FERREIRA, 2011; GUARULHOS, 2019a). No levantamento de dados e análises realizadas no presente estudo, sobre o abastecimento de água na cidade, foram observados três aspectos adicionais importantes: a necessidade de ampliação da disponibilidade de água tratada no sistema de distribuição do município, visto que o abastecimento atual registra intermitências advindas do desequilíbrio entre oferta e demanda; a necessidade de melhorar o uso dos recursos hídricos disponíveis, sobretudo em razão da localização geográfica do município, em região de baixa disponibilidade hídrica natural; e a necessidade de equacionamento do abastecimento de água às comunidades mais afastadas das áreas centrais (SOUZA, 2019).

Dentre esses aspectos, considera-se que a contínua melhoria da eficiência do uso dos recursos hídricos disponíveis requererá, por parte da concessionária, prosseguimento à execução de obras de adequação da infraestrutura hidráulica, tendendo a sustentar a operação em regime de eficiência,

requisito fundamental para garantir um serviço adequado e de redução contínua das perdas de água. Ressalta-se que o padrão de serviço estabelecido para o índice de perdas global na distribuição é bastante ambicioso, porém pertinente a um município como Guarulhos/SP, que não possui recursos hídricos próprios suficientes (SOUZA, 2019).

Finalmente, pode-se frisar que, mais do que ferramenta ou material para levantamento de dados, em estudos sobre desempenho das cidades no provimento de serviços públicos fundamentais, a Norma, com seus procedimentos e indicadores, mostra-se como um instrumento com potencial para auxiliar também no desenvolvimento de práticas urbanas sustentáveis. Tal aspecto pode contribuir para aprimorar a atuação da PMG/SP, que representa um nível de administração mais próximo da população, induzindo a difusão de práticas coletivas e individuais voltadas à conservação de recursos ambientais.

Considera-se a abordagem do tema pertinente e necessária, dentro de uma área de interesse crescente, principalmente quanto à estruturação de um sistema de indicadores e organização de informações do setor de saneamento, essencial no planejamento da utilização de recursos hídricos e gestão das cidades.

## 4 Conclusões

Os dados obtidos em sistemas públicos nacionais e municipais de informações, acerca dos indicadores contidos no item 23 da Norma, referentes ao abastecimento de água, mostraram-se adequados e suficientes para aplicação da ferramenta a respeito do tema "Água" no caso de Guarulhos/SP.

As análises realizadas propiciaram a obtenção de uma apreciação sucinta em relação à qualidade dos serviços de abastecimento de água prestados à população da cidade nos últimos anos, observando-se que, de modo geral, tem-se avançado na melhoria desses serviços. No entanto, constata-se que há, ainda, importantes desafios a enfrentar para manutenção da regularidade na oferta de água e no aprimoramento da rede de infraestrutura disponível.

Considera-se que algumas discrepâncias e lacunas detectadas, em relação a uma parte dos dados obtidos na aplicação da Norma ao caso de Guarulhos/SP, podem ser sanadas com o tempo, mediante utilização continuada dos indicadores. Por outro lado, alguns valores encontrados nos sistemas públicos de informação se mostraram bem próximos às estimativas apresentadas em estudos municipais de planejamento anteriormente elaborados, sob a perspectiva de alcance de metas em longo prazo, reforçando-se o panorama de que a cidade se encontra a caminho de um fornecimento de serviços condizente com as necessidades de seus municípios.

Diante disso, ainda que a aplicação realizada tenha sido restrita ao tema "Água", pode-se salientar que a Norma se apresenta como uma ferramenta que pode ser bastante útil no sentido de auxiliar a gestão pública municipal em seus processos de acompanhamento, análise e tomada de decisão a respeito da melhoria dos serviços prestados.

## 5 Referências

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cidades e comunidades sustentáveis – Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida**, Rio de Janeiro, p. 166, mar. 2021.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Abastecimento Urbano de Água, 2019**. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=6>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 Global, 2015**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>. Acesso em: 01 jun. 2019.

FERREIRA, R. S. **Gestão de águas urbanas em Guarulhos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, p. 160. 2011.

GUARULHOS. (Município). Secretaria de Serviços Públicos. **Revisão do Planejamento dos Serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário de Guarulhos**, Guarulhos, p. 62, out. 2018.

GUARULHOS. (Município). **Lei orgânica do Município de Guarulhos – Emendas, Ato das Disposições Transitórias, Regimento Interno da Câmara Municipal, Índice e Texto Compilado, 2019a**. Disponível em: <[https://www.guarulhos.sp.gov.br/sites/default/files/lei\\_organica/lom.pdf](https://www.guarulhos.sp.gov.br/sites/default/files/lei_organica/lom.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2021.

GUARULHOS. (Município). **Departamento de Assuntos Legislativos. Lei nº 7.730, de 4 de junho de 2019**. Substitutivo nº 01 ao Projeto de Lei nº 2260/2018 de autoria do Poder Executivo. Institui o Plano Diretor do Município de Guarulhos, o Conselho Municipal de Desenvolvimento Urbano - CMDU e dá outras providências, Guarulhos, 2019b. Disponível em: <[https://www.guarulhos.sp.gov.br/06\\_prefeitura/leis/leis\\_download/07730lei.pdf](https://www.guarulhos.sp.gov.br/06_prefeitura/leis/leis_download/07730lei.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2021.

GUARULHOS. (Município). **Estatísticas e Geografia, 2020**. Disponível em: <<https://www.guarulhos.sp.gov.br/estatisticas-e-geografia>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

JACOBI, P. **Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade**. Cadernos de Pesquisa, São Paulo, n. 118, p. 189-205, mar. 2003.

SAAE. Serviço Autônomo de Água e Esgotos. **Documentos referentes à concessão à SABESP – Consulta pública, 2019.** Disponível em: <<http://www.saaeguarulhos.sp.gov.br:8081/node/618>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Sabesp amplia rede de esgoto para mais de 100 mil pessoas em Guarulhos, 2020a.** Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/em-1-ano-sabesp-amplia-rede-de-esgoto-para-mais-de-100-mil-pessoas-em-guarulhos/>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SABESP. **Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.** Relatório de Sustentabilidade 2019, 2020b. Disponível em: <[http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios\\_sustentabilidade/Relatorio\\_Sustentabilidade\\_2019\\_port.pdf](http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_sustentabilidade/Relatorio_Sustentabilidade_2019_port.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SABESP. **Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.** **Redução de perdas por controle de pressão, 2021.** Disponível em: <<http://www.sabesp.com.br/reducaopressao/>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SANTOS, R. A. S. **Indicadores de sustentabilidade ambiental urbana – ISAU-UFBA/SEI:** potencialidades e limitações a partir de sua aplicação para a cidade de Salvador-BA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica. Salvador, p. 121. 2009.

SNIS/MDR. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento / Ministério do Desenvolvimento Regional.** Agrupamento dinâmico de indicadores e informações agregados por ano de referência, 2015; 2019. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/municipio/index#>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SOUZA, D. A. **Aplicação da Norma ABNT NBR ISO 37120/2017:** estudo sobre indicadores de abastecimento de água no município de Guarulhos/SP. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 125. 2019.

10.34033/2526-5830-v6n19-1



## Artigo técnico

# Seleção de espécies vegetais para pelotização de sementes com aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração

*Selection of plant species for seed pelletizing with applicability in the recovery of areas degraded by mining*

Maria Lucia Solera<sup>a\*</sup>, Mariana Hortelani Carnesecca Longo<sup>a</sup>, Daphne Delduca Tonon<sup>b</sup>, Caroline Almeida Souza<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente – Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil  
<sup>b</sup> Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: lucinha@ipt.br

**Palavras-chave:** recuperação de áreas degradadas; pelotização de sementes; seleção de espécies vegetais

**Keywords:** recovery of degraded areas; seed pelletizing; selection of plant species

## Resumo

A recuperação de áreas degradadas resultantes de atividades minerárias, pode ser considerada uma etapa complexa devido à variedade de cenários de degradação observados, muitos deles desafiadores. Os custos dos métodos convencionais de recuperação, fundamentados no plantio de mudas, são elevados por dependerem, dentre outros, do estabelecimento de viveiro próprio, envolvendo custos relacionados à sua instalação e manutenção, à própria produção de mudas e ao plantio, que incluem custos de construção do viveiro, aquisição de insumos, mão de obra para plantio e manutenção, bem como custos do frete para transporte das mudas. Entendendo que os custos da recuperação são elevados, podendo os mesmos ser evitados utilizando soluções sustentáveis e, diante da grande quantidade de espécies utilizadas para recuperação de áreas degradadas, este artigo apresenta o processo de seleção de espécies vegetais com potencial para pelotização de sementes, buscando a germinação direta na área degradada a ser recuperada. Para tal, considerou-se a semeadura manual e/ou mecanizada, visando à aplicação das pelotas em taludes de corte e/ou áreas de reflorestamento, de modo a racionalizar o processo da recuperação e favorecer sua efetividade, com impacto positivo nos custos envolvidos. O processo de seleção identificou seis espécies vegetais, com diferentes características, consideradas potenciais para pelotização: duas arbóreas – *Cassia ferruginea* e *Schinus terebinthifolia*; dois subarbustos – *Lepidaploa aurea* e *Stylosanthes*

sp.; uma herbácea – *Echinolaena inflexa* e uma arbustiva *Crotalaria spectabilis*. A seleção destas espécies permitiu combinações entre as espécies no processo de pelotização, garantindo a diversidade estrutural e funcional no caso de múltiplas sementes por pelota.

## Abstract

*The recovery of degraded areas caused by mining activities can be considered a complex step due to the variety of challenging degradation scenarios observed. The costs of conventional methods of recovery, based on planting seedlings, are usually high because they are dependent, for example, on the establishment of a seedling nursery, which involves costs related to: its installation and maintenance; the production of seedlings; and planting. These processes include costs of: construction of the nursery; acquisition of inputs; labor for planting and maintenance; and transportation costs. Having in mind that these high costs of recovery can be avoided by the use of sustainable solutions and, given the large number of species that can be used to recover degraded areas, this article presents the process of selecting plant species with potential for seed pelletizing, to be used in direct germination in the degraded area. Manual and/or mechanized sowing was considered to apply the pellets on cut slopes and/or areas destined for forest recovery, in order to rationalize the recovery process and favor its effectiveness, with a positive impact on costs. The selection process identified six plant species considered potential for pelletizing: two arboreal species – *Cassia ferruginea* and *Schinus terebinthifolia*; two sub-shrubs – *Lepidaploa aurea* and *Stylosanthes* sp.; one herbaceous plant – *Echinolaena inflexa*; and one shrub – *Crotalaria spectabilis*. The selection of these species allowed combining different species in the pelletizing process, ensuring structural and functional diversity in the case of multiple seeds per pellet.*

## 1 Introdução

Na condução da recuperação de um ambiente, resultante da atividade minerária, o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) deve ter seus objetivos muito bem definidos, cujo objetivo principal está na promoção da recuperação ambiental da área degradada, com suas variáveis ajustadas, destacando: necessidades legais; desejo do proprietário do terreno; e aspectos sociais e econômicos (ALMEIDA, 2016). Ressalta-se ainda, a necessidade de integrar ao planejamento inicial da mineração, metodologias de recuperação de áreas degradadas, desde o início das atividades e, assim, evitar os impactos na biodiversidade, recursos hídricos e redução dos custos do garimpo após extração (SILVA et al.; 2018), ou seja, evitar os impactos aos recursos naturais e a redução dos custos finais com a implantação do PRAD.

A recuperação consiste da aplicação de técnicas de manejo em um ambiente degradado com vista a obter um novo uso produtivo e sustentável (Sánchez, 2008). Na restauração, segundo Engel e Parrota (2003), o objetivo é recriar comunidades viáveis, de forma a proteger e estimular a capacidade natural de mudanças dos ecossistemas. Assim, o termo recuperação refere-se à reparação da área em questão, relacionado a trabalhos realizados em locais com degradação severa, como as atividades da extração de minérios e obras de construção civil (ENGEL; PARROTA, 2003), uma vez que, nesses locais, a restauração se torna difícil devido ao alto grau de impactos negativos causados na área.

A recuperação de ecossistemas degradados é uma prática que remonta a tempos pretéritos e, exemplos de sua existência podem ser encontrados na história, em diferentes épocas e regiões (RODRIGUES; GANDOLFI, 2004). Desde o século XIX, no Brasil, as plantações florestais se estabeleceram com diferentes objetivos, principalmente para a proteção de recursos hídricos (ENGEL; PARROTA, 2003). A ausência de conhecimentos sobre os ecossistemas e sobre os recursos necessários para recuperar uma área degradada, bem como a inexistência de produção de mudas nativas, conduziu a realização de plantios aleatórios, com baixa diversidade de espécies, utilizando até mesmo espécies exóticas (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2009; ALMEIDA, 2016).

A partir de 1970, as necessidades de se reparar danos ambientais, decorrentes da atividade minerária e margens de corpos d'água de usinas hidrelétricas, impulsionaram novos plantios de restauração no Brasil (DURIGAN; ENGEL, 2012). A busca pela recuperação de áreas era baseada no plantio de mudas, uma vez que era possível prever o desenvolvimento das espécies e o número exato de indivíduos plantados nas áreas a serem recuperadas (RODRIGUES et al., 2007). Com a demanda de novos plantios, a partir de 1980, as universidades e seus pesquisadores focaram na recuperação da mata ciliar e de áreas mineradas. Estas últimas objetivavam, exclusivamente, a remediação dos danos causado ao solo exposto (DURIGAN; ENGEL, 2012).

Em 1990, as pesquisas no Brasil avançaram considerando outros biomas, além da Mata Atlântica, para a recuperação. Também foram consideradas outras técnicas de restauração, além do reflorestamento, não somente com objetivo de proteção a biodiversidade, mas também da área como um todo (DURIGAN; ENGEL, 2012). Com o aumento do conhecimento, surgiram novos estudos, propostas e modelos de recuperação utilizando espécies nativas e diferentes metodologias de plantio (ALMEIDA, 2016). Mesmo que, apoiada sobre uma base teórica frágil, parte dos avanços obtidos nessa fase continuam incorporados na metodologia de restauração (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2009).

## 1.1 Recuperação de áreas degradadas pela mineração

Em áreas muito perturbadas, o recobrimento do solo é lento, principalmente em locais com pouco ou nenhum fragmento florestal próximo, onde a intervenção se mostra essencial, garantindo o estabelecimento da vegetação (MINELLA; BÜNDCHEN, 2013). Assim, diferentes modelos de RAD,

tais como: rebrota de tronco ou raízes; regeneração natural, a partir de plantas jovens já existentes na área e de sementes no solo; dispersão de sementes; semeadura direta; e plantio de mudas (RODRIGUES, et al.; 2009), por apresentarem formas de distribuição dos diferentes grupos ecológicos no local, onde se pretende fazer a revegetação, podem ser utilizados nos programas de RAD (MACEDO, et al, 1993). A revegetação de áreas degradadas requer a utilização de espécies vegetais capazes de se desenvolverem sob condições nem sempre ideais, no que se refere, principalmente, às condições adversas físicas e químicas do solo, e que também colaborem para a melhoria da qualidade do solo, possibilitando o desenvolvimento de espécies vegetais menos resistentes ao cenários/ contexto de degradação.

Em relação a modelos de RAD, não baseados em plantio de mudas, Solera et al. (2014) citam dois já utilizados pelo setor minerário. O primeiro deles, a hidrossemeadura conjugada com biomanta, comumente adotado pelo setor, envolve custos relacionados à instalação de biomanta e aplicação mecanizada de mistura de sementes, que incluem custos de insumos (ex.: sementes, fertilizantes e mulch), de mão de obra (ex.: para instalação de biomanta) e de equipamento para a hidrossemeadura. Os autores ainda ressaltam que, apesar de esse método apresentar elevada aplicabilidade para a RAD de bancadas e taludes de cava de mineração, com o recobrimento vegetal e controle da erosão, propicia baixo valor agregado em termos ecológicos, por não privilegiar a restauração das funções ecológicas do sistema. O segundo método citado por Solera et al. (2014) é a transposição da camada superficial do solo, contendo o horizonte A e parte do horizonte B (topsoil), que envolve custos de sua retirada e armazenamento e, posteriormente, de transporte e de recolocação na área a recuperar.

É importante ressaltar que a utilização do topsoil em áreas de mineração, deve ser priorizada, cujas vantagens do seu uso estão no fornecimento de sementes e outros propágulos, presença de microrganismos benéficos, redução no uso de fertilizantes e rápida cobertura do solo (GRANT, et al. 2016).

A pelotização é um processo de aglomeração que visa à união de materiais particulados, sólidos e de menor granulometria, por meio da formação de forças físicas de curto alcance entre os próprios sólidos ou da presença de ligantes, para a formação de aglomerados de tamanhos maiores (PIETSCH, 2005). Para este artigo o termo pelotização foi utilizado para designar estruturas mais arredondadas (pelotas), enquanto que alguns autores utilizam o termo peletização, para as estruturas mais alongadas (pellets). A pelotização de sementes consiste na aplicação de materiais secos, rígidos, uniformes e inertes sobre a superfície das sementes, com vistas a conferir melhores propriedades, sem alterações negativas na germinação e no desenvolvimento das plantas (SILVA; NAKAGAWA, 1998; SIKHAO et al. 2015). A técnica, utilizada para aglomeração ou recobrimento de sementes, possui como objetivo principal modificar as características físicas das sementes, de forma a adequar sua forma, tamanho e/ou textura com o intuito de facilitar sua semeadura, seu manuseio, transporte e armazenamento (BAYS et al. 2007). A proposição de um modelo de RAD, utilizando sementes pelotizadas com germinação direta na área degradada possibilita reduzir etapas, como a produção, transporte e aplicabilidade do método, com impacto positivo nos custos da RAD. Dessa forma, a pelotização de sementes se constitui um método promissor

na recuperação de áreas degradadas. Entretanto, a escolha de espécies vegetais com maior potencial para a pelletização de sementes é etapa fundamental e não totalmente explorada na literatura científica, especialmente para a RAD de áreas mineradas.

Alguns estudos apontam o uso sementes de espécies vegetais para RAD, que foram testadas para pelletização. Almeida (2004) utilizou sementes pelletizadas de três grupos ecológicos (*Cedrella fissilis*, *Copaifera langsdorffii*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Guazuma ulmifolia*, *Lithraea molleoides*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna macranthera*, *Senna multijuga*, *Sesbania virgata*, *Solanum granuloso-leprosum*, *Tabebuia serratifolia* e *Trema micrantha*), para verificar a emergência de plântulas para implantação de Matas Ciliares por plantio direto testadas em casa de vegetação (testemunho e pelletizadas); laboratório (testemunho e pelletizadas) e campo (testemunho). Os resultados mostraram que as espécies estudadas são passíveis de passar por processo de pelletização e que a semeadura mecanizada com sementes pelletizadas é viável e promissora para RAD. Pozitano (2011) realizou estudos utilizando *Senna macranthera* para analisar estatisticamente as porcentagens de germinação para sementes: in natura, sementes recobertas; sementes escarificada e recobertas; sementes escarificadas e in natura. Os resultados mostraram que o processo de recobrimento preserva o poder germinativo no armazenamento e as características químicas e físicas de cada espécie influencia na germinação. SILVA et al. (2006) estudou o efeito da temperatura na germinação de sementes osmocondicionadas e pelletizadas de macela – (*Egletes viscosa* (L.) Less), cujos resultados mostraram a velocidade de germinação com e sem osmocondicionamento semelhantes em 25° e inferiores na temperatura alternada de 20° a 30°C e que nas sementes osmocondicionadas em temperatura alternada, o Índice de Velocidade de Germinação (IGV) é superior as sementes sem osmocondicionamento.

Nesse contexto, este artigo apresenta uma parte dos resultados obtidos no Projeto "Processo de pelletização de sementes para fins de recuperação de áreas degradadas (RAD) – Fase 1" que considerou a busca por espécies vegetais com maior potencial de pelletização para aplicação em áreas degradadas pela atividade minerária, visando sua recuperação (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021).

A próxima fase do projeto, que corresponde a Fase 2, deverá avaliar o desempenho das pelotas a partir de testes em casa de vegetação, utilizando as sementes selecionadas, e em experimentos de campo, que deverá abranger o planejamento, a condução e a análise dos resultados do experimento, envolvendo a descrição da tecnologia, com as especificações técnicas das pelotas de sementes, método de semeadura, tipo de área degradada para sua aplicação e uso e demais características da tecnologia, cujo processo de pelletização ao qual se refere a Fase 2, deverá ser realizado no âmbito da continuidade da pesquisa.

## 2 Procedimento metodológico

Frente à grande quantidade de espécies utilizadas para RAD, procurou-se buscar e organizar as informações necessárias para identificar as espécies potenciais para pelotização, tais como: (a) identificação botânica; (b) ocorrência – bioma e fitofisionomia; (c) endemismo; (d) resistência à toxidez; (e) tamanho da semente/fruto; (f) forma da semente; (g) forma de vida-estrato – arbóreo, arbustivo e herbáceo; (h) síndrome de dispersão; (i) classe sucessional; (j) grupo ecológico; (k) beneficiamento do fruto e sementes; (l) dormência da sementes, quando disponíveis, uma vez que, algumas dessas informações se apresentam escassas ou contraditórias.

Assim, com vistas a averiguar a possibilidade da formação de um aglomerado de múltiplas sementes na composição das pelotas, entre as espécies pré-selecionadas, foram consideradas as espécies vegetais com sementes de tamanhos de até 3 mm, independentemente da sua forma. Assim, considerando a grande heterogeneidade do formato das sementes das espécies listadas, optou-se por adotar uma classificação simplificada: sementes esféricas, alongadas, triangulares e achatadas.

As espécies pré-selecionadas como potenciais para serem pelotizadas foram organizadas em forma de lista, elaborada a partir de revisões taxonômicas, teses e artigos, referentes, preferencialmente, à fitofisionomia de campos rupestres, por ser a formação vegetal que se associa aos afloramentos rochosos ferruginosos, sujeitos a degradação e a demandar recuperação, o que torna este ambiente de interesse para a atividade minerária parceira do projeto. Os levantamentos de dados secundários foram obtidos, principalmente, por meio de plataformas acadêmicas online, como Web of Science, Scielo e Google Scholar. As espécies foram classificadas a partir das características consideradas chave para o processo de pelotização voltada à RAD por mineração, a saber: forma das sementes; forma de vida-estrato; resistência à toxidez; bioma; endemismo; síndrome de dispersão; e tamanho das sementes.

Uma vez elaborada a lista de espécies pré-selecionadas como potenciais para o processo de pelotização, aplicou-se uma sequência de filtros, apresentados no **Quadro 1**, com vistas a auxiliar na tomada de decisão da escolha de, no máximo, seis espécies diferentes entre arbóreas, arbustivas e herbáceas, para uso no processo de pelotização, a partir de critérios de agrupamento das espécies pré-estabelecidos, conforme mostra o **Quadro 2**.

**Quadro 1 – Sequência de filtros e critérios aplicados na lista de espécies vegetais pré-selecionadas como potenciais para o processo de pelotização**

Filtro	Critérios pré-estabelecidos
Filtro 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exclusão de espécies</li> <li>- ausência de informações sobre a forma da semente</li> <li>- tamanho da semente maior que 3 mm</li> </ul>
Filtro 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerando o resultado do primeiro filtro, para selecionar espécies que apresentavam ampla distribuição</li> <li>- ocorrência em mais de um bioma</li> <li>- ou em três fitofisionomias distintas</li> </ul>
Filtro 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exclusão de espécies consideradas trabalhosas nas etapas de beneficiamento das sementes:</li> <li>- espécies com sementes que precisam ser peneiradas (tamanhos heterogêneos)</li> <li>- espécies que apresentam sementes aderidas ao fruto, como: aquênios, cípselas, cápsulas, baga, espigueta, drupa e nuculânios</li> </ul>

Fonte: elaborado pelos autores.

**Quadro 2 – Critérios pré-estabelecidos para tomada de decisão da escolha de espécies para pelotização**

Descrição dos critérios de agrupamentos das espécies
Critério 1 – Resistência à toxidez de elementos
Critério 2 – Diversificação de formas de vida – diversidade estrutural do ambiente
Critério 3 – Tamanho e formas das sementes
Critério 4 – Informações ecológicas: maior taxa de cobertura de solo – rápido crescimento; melhoria do solo – adubos verdes

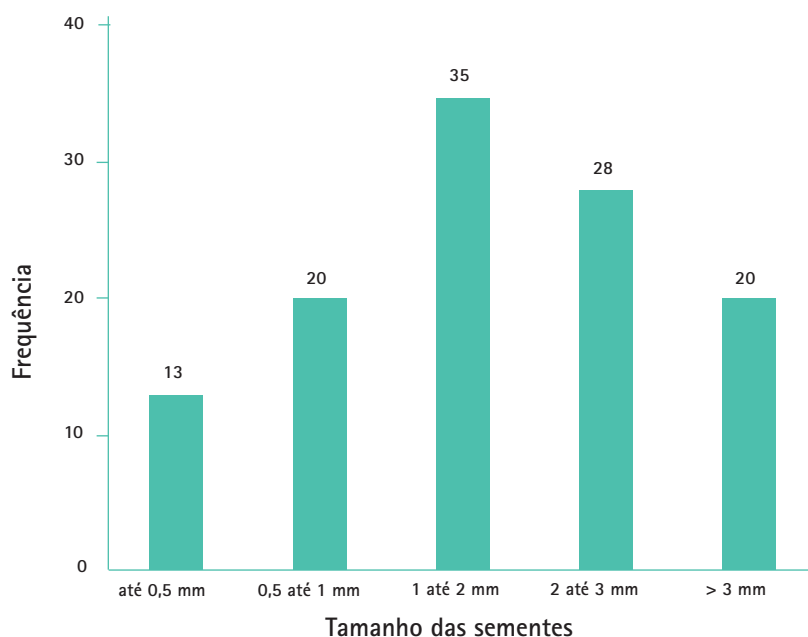
Fonte: elaborado pelos autores.

Por fim, foram feitos exercícios de agrupamentos das espécies resultantes dos filtros, conforme os critérios pré-estabelecidos (**Quadro 2**) e a disponibilidade de sementes no mercado, gerando os critérios finais para a seleção de espécies vegetais, muito importantes para os ensaios de pelotização, de forma a definir as espécies a serem efetivamente consideradas para uso no processo de pelotização do projeto de pesquisa.

### 3 Resultados e Discussão

A revisão de literatura gerou uma lista de 116 espécies potenciais para o processo de pelotização. Para o processo de dispersão ou transporte de sementes e frutos, relacionados às espécies elencadas, dentre os principais grupos de síndromes foram identificadas três formas de dispersão: (a) zoocoria – 50 espécies; (b) autocoria – 33 espécies; e (c) anemocoria – 18 espécies, sendo 15 delas estão sem informações quanto à dispersão. Das 116 espécies, 47 possuem informação de não resistentes à toxidez de elementos e 69 espécies possuem resistência à toxidez de alguns elementos. As sementes das espécies identificadas também possuem tamanhos variados conforme mostra a **Figura 1**, sendo que a maioria está dentro do valor estabelecido para desenvolver as pelotas, ou seja, até 3 mm.

**Figura 1 –** Frequência do tamanho das sementes das espécies identificadas.



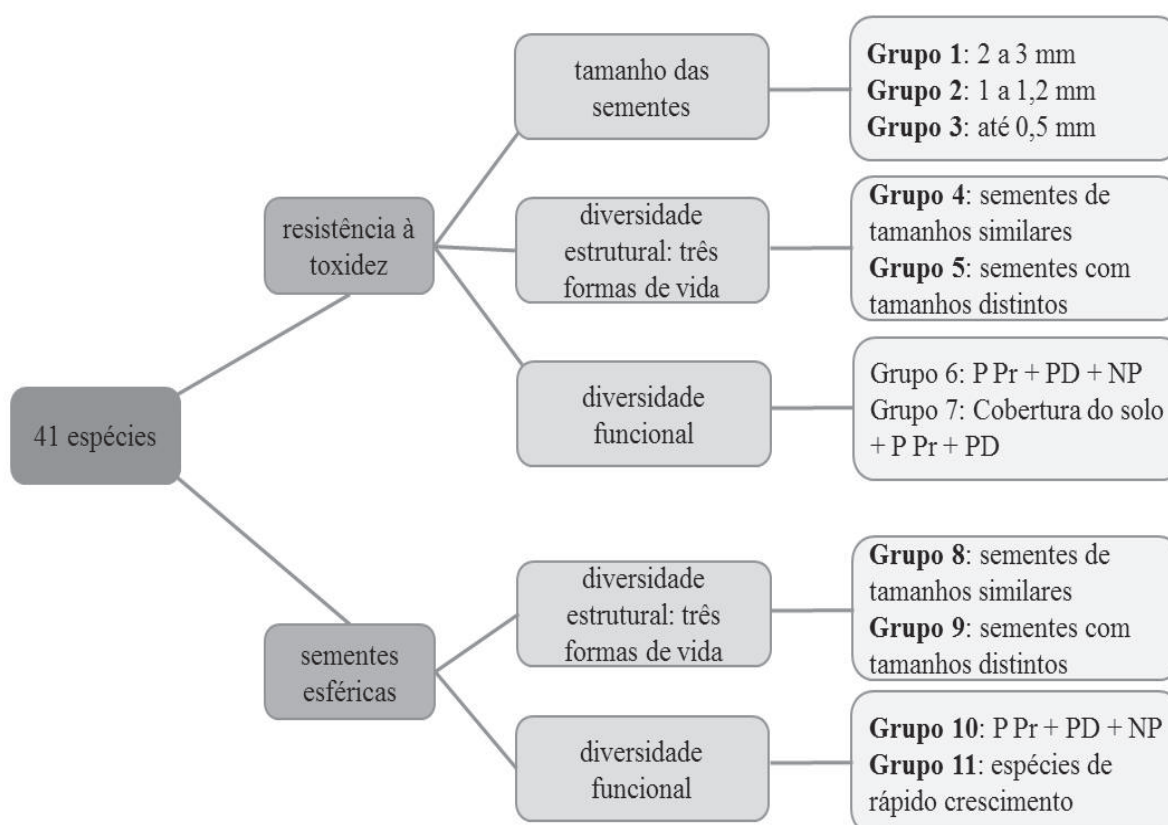
Fonte: elaborado pelos autores.

A aplicação dos filtros resultou em 41 espécies potenciais para pelotização (**Figura 2**), representadas, na sua maioria, pelas famílias Melastomataceae e Campanulaceae. A **Figura 3** mostra as principais informações sobre as 41 espécies potenciais, após aplicação de filtros.



O agrupamento de espécies vegetais, conforme os critérios pré-estabelecidos para auxiliar na tomada de decisão da escolha de espécies para o processo de pelotização, gerou grupos conforme a combinação dos critérios. Nesse sentido, 11 grupos de espécies foram formados a partir de critérios anatômicos e ecológicos, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Agrupamento de espécies segundo critérios anatômicos e ecológicos: (P) pioneira; (NP) não pioneira; (Pr) = preenchimento; (D) = diversidade.



Fonte: elaborado pelos autores.

Dentro do agrupamento de espécies resistentes à toxidez de elementos, o Grupo 1 refere-se às sementes maiores, o Grupo 2 às sementes de tamanho intermediário e o Grupo 3 às sementes menores. O Grupo 4 refere-se às espécies que ocupam estratos diferentes, pelo menos uma espécie por forma de vida, com tamanho de semente semelhante e o Grupo 5 refere-se às espécies que ocupam estratos diferentes, com ao menos uma espécie por forma de vida, porém, com tamanho de semente diferentes. O Grupo 6 refere-se ao conjunto de espécies arbóreas que apresentam diferentes funções ecológicas, procurando representar maior diversidade de grupos ecológicos e sucessionais, com espécies pioneiras do grupo de preenchimento, espécies pioneiras

do grupo de diversidade e espécies não pioneiras – secundárias iniciais e tardias. Finalmente, o Grupo 7 contempla às espécies iniciais do processo sucessional, como as herbáceas e arbustivas que apresentam características de recobrimento do solo e as arbóreas pioneiras, tanto do grupo de preenchimento como do grupo de diversidade.

No agrupamento pelo critério principal da espécie possuir semente esférica, o Grupo 8 refere-se às espécies que ocupam estratos diferentes, ao menos uma espécie por forma de vida, com tamanho de semente semelhante e o Grupo 9 refere-se às espécies que ocupam estratos diferentes com pelo menos uma espécie por forma de vida, porém com tamanho de semente diferentes. O Grupo 10 refere-se ao conjunto de espécies arbóreas que apresentam diferentes funções ecológicas, procurando representar maior diversidade de grupos ecológicos e sucessionais, com espécies pioneiras do grupo de preenchimento, espécies pioneiras do grupo de diversidade e espécies não pioneiras – secundárias iniciais e tardias, e o Grupo 11 contempla às espécies iniciais do processo sucessional que apresentam características de recobrimento do solo, como as herbáceas, arbustivas e arbóreas pioneiras do grupo de preenchimento.

A revegetação de áreas degradadas exige a utilização de espécies vegetais capazes de se desenvolverem em condições nem sempre ideais, no que se refere, sobretudo, às condições físicas e químicas do solo, e que sua introdução no ambiente igualmente contribua para a melhoria da qualidade do solo, possibilitando o desenvolvimento de outras espécies vegetais menos resistentes a condições de degradação.

Na escolha de espécies vegetais, foram consideradas aquelas com maior possibilidade de se desenvolverem em ambientes degradados, com base em características específicas, tais como: ocorrência em diferentes biomas e em diferentes fitofisionomias, classes sucessionais e grupos funcionais (BARBOSA et al., 2017), resistência a toxidez de metais pesados encontrados no solo, tais como o ferro e o alumínio (ZAPPI et al., 2018), ocorrência em diferentes tipos de solo (POTT; POTT, 2002), potencial em atuação como adubação verde (WUTKE, et al. 2007), síndromes de dispersão de sementes (PERES, 2016).

Além dessas características, para seleção das espécies que foram adquiridas para os ensaios de pelotização, da lista filtrada com 41 espécies potenciais, considerou-se também a análise de alguns outros aspectos relevantes, conforme mostra o **Quadro 3**, resultando em 16 espécies potenciais para o desenvolvimento das pelotas.

Quadro 3 – Aspectos analisados para seleção das espécies.

Critérios de Seleção	Observações
Diversidade de formas de vida	Inclusão de espécies arbóreas, arbustivas e herbáceas entre as espécies adquiridas, para otimizar a cobertura do solo em diversos contextos de degradação e diversificar a condição estrutural da área permitindo a criação de diferentes habitats
Tamanho e formas das sementes	Aspecto analisado para verificar as melhores combinações entre as espécies a adquirir para obter combinação com sementes de classes semelhantes de tamanho e forma, para otimizar a formação das pelotas
Informações ecológicas	Dar preferência a uma combinação de espécies que proporcionassem maior taxa de cobertura de solo, rápido crescimento e melhoria do solo, e incluir espécies de adubos verdes na combinação de espécies a adquirir;
Preferências por espécies metalólicas – resistência a toxidez de elementos	Importante para contextos de ambientes degradados com toxicidade de metais, não sendo um critério de exclusão caso alguma espécie não apresentasse essa característica
Espécies já pelletizadas experimentalmente	Inclusão de espécies já testadas em experimentos de pelletização para aumentar as chances de ter-se um bom resultado de desempenho. Ressalta-se que dentre as espécies pré-selecionadas, poucos estudos foram encontrados relatando experiências de pelletização
Espécies comerciais	Realizou-se levantamento sobre a facilidade de aquisição das espécies potenciais, visto que era um fator limitante para a realização dos ensaios

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir dos critérios de seleção apresentados no **Quadro 3**, foram elencadas 16 espécies potenciais para o desenvolvimento das pelotas, cuja identificação e respectivas informações relacionadas aos critérios selecionados estão apresentadas no **Quadro 4**. Considerou-se que para a aquisição das sementes seria necessário reduzir a quantidade de espécies e, com a definição da lista das 16 espécies, foi possível realizar combinações, avaliando principalmente o critério de diversidade estrutural, que define a necessidade de combinar as três formas de vida forma de vida-estrato – herbácea, arbustiva e arbórea. Isto feito foi possível combinar uma espécie para cada estrato nas diferentes classes de tamanho e forma das sementes, bem como na combinação das espécies arbóreas de acordo com a classificação quanto ao estágio sucessional, ao grupo ecológico e ao potencial de atuar como adubação verde.

Quadro 4 – Espécies selecionadas para subsidiar a aquisição de sementes para pelotização.

Espécie	Características	Espécie	Características
<i>Axonopus aureus</i>	Herbácea; Potencial forrageiro; Acumuladora de biomassa; Pioneira; Preenchimento; Cariopse esférica de 1,1 mm; e Possui comercialização	<i>Chamaecrista desvauxii</i>	Arbustiva; Pioneira; Perene; Semente esférica com 5,2 mm; Fixadora de Nitrogênio; e Possui comercialização
<i>Echinolaena inflexa</i>	Herbácea; Alta produção de biomassa; Forrageira Pioneira; Preenchimento; Metalófita; Sementes de 2 mm; e Possui comercialização	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Arbórea; Pioneira; Preenchimento; Sementes esféricas de 5 mm; Fácil comercialização; e Já pelotizada
<i>Paspalum densum</i>	Herbácea; Perene; Metalófita; Não Pioneira; Diversidade; Cariopse esférica de 1,4 mm; e Uso em pastagem	<i>Schinus terebinthifolia</i>	Arbórea; Pioneira; Preenchimento; Sementes esféricas de 3 mm; Agressiva; e Fácil comercialização
<i>Evolvulus glomeratus</i>	Herbácea; Forrageira; Semente com 1,7 mm; Ampla distribuição; e Fácil comercialização	<i>Mimosa bimucronata</i>	Arbórea; Pioneira; Preenchimento; Metalófita; Semente esférica de 4,5 mm; e Fácil comercialização
<i>Achyrocline satureioides</i>	Herbácea; Preenchimento; Diversidade; Forrageira; Cipsela esférica de 0,8 mm; e Fácil comercialização	<i>Mimosa scabrella</i>	Arbórea; Pioneira; Preenchimento; Semente esférica de 6 mm; e Fácil comercialização
<i>Pennisetum setosum</i>	Herbácea; Crescimento agressivo; Capacidade de inibir desenvolvimento de nativas; e ocorre em diferentes tipos de solo	<i>Alternanthera tenella</i>	Herbácea; Metalófita; Alta colonização; Agressiva
<i>Stylosanthes macrocephala</i>	Herbácea; Adubação; verde; Fixadora de Nitrogênio; e fácil comercialização	<i>Baccharis dracunculifolia</i>	Arbustiva; Pioneira; Alta colonização; e Invasora
<i>Arachis pintoi</i>	Herbácea; Apresenta Dormência; Fixadora de Nitrogênio; Forrageira Perene; Sementes de 13 mm; e Fácil comercialização	<i>Periandra mediterranea</i>	Arbustiva; Metalófita; Planta facilitadora; Semente alongada de 3 mm; e Apresenta associações simbióticas

Fonte: elaborado pelos autores.

Com a definição do conjunto de 16 espécies passíveis de pelotização, a busca para a aquisição de sementes considerou a disponibilidade de espécies no mercado, confiabilidade na qualidade das sementes e o credenciamento do viveiro no Registro Nacional de Sementes e Mudas (RENASSEM).

A indisponibilidade no mercado de algumas das espécies selecionadas levou à escolha por outras, com características muitas vezes semelhantes àquelas que seriam substituídas, como: diferentes formatos; tamanho das sementes; rápido crescimento e cobertura do solo; espécies potenciais para adubação verde; espécies já pelotizadas; e leguminosas fixadoras de nitrogênio. Foram selecionadas seis espécies de diferentes características ecológicas, conforme mostra o **Quadro 5**.

**Quadro 5 – Espécies selecionadas para aquisição de sementes e pelotização.**

Espécie	Família	Hábito	Outras Características
<i>Echinolaena inflexa</i> (capim-flexinha)	Poaceae	Herbácea	Maior produção de biomassa; maior taxa de sobrevivência; baixa necessidade de água e nutrientes; porcentagem de germinação menor que 10%; cobertura do solo em 2 anos menor que 1%
<i>Lepidaploa aurea</i> (amargoso)	Asteraceae	Subarbusto	Bom desenvolvimento em Cerrado; indiferente à fertilidade do solo; solos drenados, rasos e profundos; cobertura do solo de 6% em 30 meses; porcentagem de germinação de 10 a 19%; rápido crescimento
<i>Crotalaria spectabilis</i> (crotalária)	Fabaceae	Arbustiva	Grande produção de biomassa; sementes de 5 mm; esféricas; leguminosa fixadora de nitrogênio (adubo verde); capacidade de controle de ervas daninhas; bom crescimento em solos compactados; rápido crescimento
<i>Stylosanthes sp.</i> (estilosante)	Fabaceae	Subarbusto	Fixação de nitrogênio (adubo verde); resistente à seca; uso em RAD; adaptada a baixa fertilidade do solo; fácil comercialização; sementes esféricas de 2,2 mm
<i>Cassia ferrugínea</i> (canafistula)	Fabaceae	Arbórea	Não pioneira; grupo de diversidade; capacidade de sobrevivência em solos pobres; dormência tegumentar; sementes de 9 mm
<i>Schinus terebinthifolia</i> (aroeira-pimenteira)	Anacardiaceae	Arbórea	Pioneira; heliófita; agressiva/rústica; comum em diferentes ambientes; muito usada em RAD; sementes esféricas de 3 mm; fácil comercialização

Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme mostra o **Quadro 5**, todas as espécies apresentaram certo grau de rusticidade, com capacidade de sobreviver em solos pobres e com baixa necessidade de água, bem como a possibilidade de formação de grande quantidade de biomassa e de fixação de nitrogênio, que possibilitará a melhoria do solo na área a ser recuperada. Tomou-se o cuidado de adquirir duas espécies por forma de vida (hábito), o que permitirá combinações entre as espécies no processo de pelotização, garantindo a diversidade estrutural e funcional no caso de múltiplas sementes por pelota.

## 4 Conclusões

O alto número de espécies identificadas com potencial de serem pelotizadas, levou a aplicação de três filtros pré-estabelecidos: Filtro 1 – exclusão de espécies com ausência de informações sobre a forma das sementes – 88 espécies; Filtro 2 – tamanho maior que 3 mm e semente aderidas ao fruto –

50 espécies; e Filtro 3 – espécies com sementes com necessidade de serem peneiradas e outras ações – 41 espécies, as quais foram classificadas de acordo com a forma das sementes; forma de vida; resistência a toxidez; bioma; endemismo; síndrome de dispersão; e tamanho das sementes.

Para a seleção das espécies a serem adquiridas para os ensaios de pelotização, a partir da lista filtrada com 41 espécies potenciais para pelotização, considerou-se a análise dos seguintes aspectos: diversificação de formas de vida; tamanho e formas das sementes; informações ecológicas; preferência por espécies metalófitas; espécies já pelotizadas experimentalmente; e espécies comerciais, resultando em 16 espécies potenciais para desenvolvimento das pelotas.

Assim, na aquisição das sementes, priorizou-se a diversidade estrutural, por meio da combinação de três formas de vida – herbácea, arbustiva e arbórea; combinação de uma espécie para cada estrato, nas diferentes classes de tamanho e forma das sementes; e combinação de espécies arbóreas de acordo com a classificação quanto ao estágio sucessional, ao grupo ecológico e ao potencial de atuar como adubação verde. Definidas as combinações possíveis dentre o conjunto das 16 espécies, foi considerada a disponibilidade de espécies no mercado, confiabilidade na qualidade das sementes e o credenciamento do viveiro no Registro Nacional de Sementes e Mudanças (RENASSEM).

Diante da indisponibilidade no mercado de algumas das espécies selecionadas, foram escolhidas outras espécies, muitas vezes com características semelhantes às aquelas que foram substituídas, sendo selecionadas seis espécies de diferentes características: *Echinolaena inflexa* (herbácea); *Lepidaploa aurea* (subarbusto); *Crotalaria spectabilis* (arbustiva); *Stylosanthes* sp. (subarbusto); *Cassia ferruginea* (arbórea) e *Schinus terebinthifolius* (arbórea). Essas espécies apresentam certo grau rusticidade; capacidade de sobreviver em solos pobres e com baixa necessidade de água; possibilidade de formação de grande quantidade de biomassa e de fixação de nitrogênio. A escolha por duas espécies por forma de vida (hábito) permitiu combinações entre as espécies no processo de pelotização, garantindo a diversidade estrutural e funcional no caso de múltiplas sementes por pelota.

O método de seleção de espécies vegetais para uso no processo de pelotização para RAD de áreas mineradas foi eficiente para a tomada de decisão com critérios técnicos e comerciais para realização de projeto de pesquisa de maneira a aumentar as chances de sucesso dos resultados do projeto.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem a Vale S.A. pelo apoio ao projeto “Processo de pelotização de sementes para fins de recuperação de áreas degradadas (Fase 1); ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas e à colega Tayna Cunha Souza, da Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pelas contribuições ao projeto.

## 6 Referências

- ALMEIDA, N. O. **Implantação de matas ciliares por plantio direto utilizando-se sementes pelletizadas**. 2004. 269 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- ALMEIDA, D. S. **Plano de recuperação de áreas degradadas (PRAD)**. In: ALMEIDA, D. S. Recuperação ambiental da Mata Atlântica. 3 ed. Ilhéus, BA: EDITUS, 2016, pp. 140-158. Disponível em: <http://books.scielo.org/id/8xvf4>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- BARBOSA, L. M. et al. (org.). **Lista de espécies indicadas para restauração ecológica para diversas regiões do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2017. 344p.
- BAYS, R. et al. **Recobrimento de sementes de soja com micronutrientes, fungicida e polímero**. [s. l.], v. 29, n. 2, p. 60-67, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222007000200009>.
- BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Uma visão ecossistêmica do processo de Restauração ecológica**. In: Rodrigues, R. R. Pacto para a restauração ecológica da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. São Paulo: LERF; Piracicaba: ESALQ, 2009. 256 p.
- DURIGAN, G.; ENGEL, V. L. **Restauração de ecossistemas no Brasil: onde estamos e para onde podemos ir?** In: Martins, S. V. Restauração ecológica de ecossistemas degradados. Viçosa, MG: UFV, 2012. p. 41-68.
- ENGEL, V. L.; PARROTA, J. A. **Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais**. In: KAGEYAMA, P. Y. et al. (ed.). Restauração ecológica de ecossistemas naturais. Botucatu: FEPAF, 2003. p. 3-26.
- GRANT, C. et al. **Mine rehabilitation: leading practice sustainable development program for the mining industry**. Canberra, ACT: Commonwealth of Australia. 2016.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Processo de Pelotização de Sementes para fins de Recuperação de Áreas Degradadas (Fase 1)**. São Paulo: IPT, 2021. 250 p. (Relatório Técnico 161.728-205)
- MACEDO, A. C. et al, **Revegetação: matas ciliares e de proteção ambiental**. Revisado e ampliado por KAGEYAMA, P. Y.; DA COSTA, L. G. S. São Paulo: Governo do estado de São Paulo, Secretária do Meio Ambiente/Fundação Florestal, 1993. 27p.
- MINELLA, G. M.; BÜNDCHEN, M. **Técnicas de Nucleação aplicadas na recuperação de áreas degradadas**. 2011. Monografia. (Aperfeiçoamento/Especialização em Diagnóstico Amb. e Recup. Áreas Degradadas) - Universidade Comunitária da Região de Chapecó. 2013.

PERES, M. **Estratégias de dispersão de sementes no Bioma Cerrado: considerações ecológicas e filogenéticas.** 2016. 360 f. Tese (Doutorado em Botânica) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

PIETSCH, W. **Agglomeration in industry: occurrence and applications.** Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. 825 p.

POTT, A.; POTT, V. J. **Plantas nativas para recuperação de áreas degradadas e reposição de vegetação em Mato Grosso do Sul.** Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2002. 6 p. (Comunicado Técnico – EMBRAPA. n. 75).

POZITANO, M. **Conservação da viabilidade de sementes de *Senna macranthera* por meio de recobrimento.** 2011. 119 f. Tese (doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266857>. Acesso em 01 jul. 2021

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. **Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares.** In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. (Ed.). *Matas ciliares: conservação e recuperação.* São Paulo: EDUSP, 2004. p. 235-247.

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S.; ATTANASIO, C. M.; NAVE, A. G. **Adequação ambiental de propriedades agrícolas.** In: FUNDAÇÃO CARGILL (coord.). *Manejo ambiental e restauração de áreas degradadas.* São Paulo: 2007. p. 145-171.

RODRIGUES, R. R. et al. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal.** São Paulo: Instituto BioAtlântica, 2009. 266 p.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos.** Oficina de textos. 2a ed. 2008.

SILVA, S. O. et al. **Efeito da temperatura na germinação de sementes osmocondicionadas e peletizadas de macela (*Egletes viscosa* (L.) Less.** *Revista Ciência Agronômica*, v. 37, n. 3, p. 345-349, 2006.

SILVA, J. C. D. S.; PASCHOALIN FILHO, J. A. **Estudo comparativo entre técnicas de proteção superficial de taludes situados na rodovia SP-263: biomanta, hidrossemeadura e grama em placa.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, 7. 2018, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Uninove, 2018.

SILVA, J. B. C.; NAKAGAWA, J. **Metodologia para avaliação de materiais cimentantes para a peletização de sementes.** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 16, n. 1, p. 31-37, 1998.

SIKHAO, P. et al. **Development of seed agglomeration technology using lettuce and tomato as model vegetable crop seeds.** Scientia Horticulturae, [s. l.], v. 184, p. 85-92, 2015.

SOLERA, M. L.; GALLARDO, A. L. C. F. ; SOUZA, C. A.; LONGO, M. H. C.; BRAGA, T. O. **Bioengenharia de solos:** aplicabilidade na recuperação de áreas mineradas e na oferta de serviços ambientais. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online), v. 34, p. 46-59, 2014.

WUTKE, E. B. et al. **Bancos comunitários de sementes de adubos verdes:** informações técnicas. Brasília, DF. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007. 52 p.

ZAPPI, D. C. et al. **Plantas nativas para recuperação de áreas de mineração em Carajás.** Belém: Instituto Tecnológico Vale, 2018. 286 p. Disponível em: <<https://www.itv.org/wp-content/uploads/2019/11/RADCarajas.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

10.34033/2526-5830-v6n19-2



## Artigo técnico

# Estudo de viabilidade de cogeração a gás natural associada a resfriador de líquido por absorção e sistema fotovoltaico conectado à rede no setor industrial farmacêutico

*Feasibility study of natural gas trigeneration associated with absorption chilled water and on grid photovoltaic system in the pharmaceutical industrial sector*

Laércio Antônio Piva <sup>a\*</sup>, Wagner Aldeia <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. São Paulo - SP, Brasil.

<sup>b</sup> Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. São Paulo

E-mail: piva@consultoriajundiai.com.br

## Palavras-chave:

Trigeração híbrida de energia; Trigeração a gás natural; Sistema fotovoltaico conectado à rede; Resfriador de líquido por absorção; Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

## Keywords:

*Hybrid power generation. Natural gas trigeneration. On grid photovoltaic system. Absorption chilled water system. Technical, economic and environmental feasibility study.*

## Resumo

Motivado pela demanda energética crescente e riscos de escassez no pós-pandemia, este desenvolvimento avaliou a viabilidade técnica, econômica e ambiental de planta de trigeração a gás natural associada a um sistema fotovoltaico conectado à rede, para produção de eletricidade, água gelada e água quente no setor industrial farmacêutico. O estudo se baseou em um modelo de geração híbrida, denominado cenário básico, e quatro alternativos, sendo três híbridos e uma trigeração a gás natural tradicional. Simuladores de processos e sistemas fotovoltaicos foram utilizados, variando o tempo de operação do motogerador e quantidade de módulos fotovoltaicos, bem como a associação a resfriadores de líquido por absorção do tipo água quente cogorada e queima direta de gás natural. Os resultados em termos de eficiência energética e emissão de dióxido de carbono foram favoráveis para todos os cenários estudados, enquanto os indicadores econômicos perderam atratividade com o aumento do tempo em carga do gerador a gás natural, bem como com a redução da energia gerada em painéis fotovoltaicos. A usina híbrida do cenário básico, mostrou-se técnica e financeiramente viável, composta por motogerador operando 8 horas por dia, sistema fotovoltaico na potência máxima e armazenamento de água quente para

uso sanitário. Resultou em fator de utilização de energia de 72,9%, taxa interna de retorno de 15,8%, além de reduções de 38,3% dos custos operacionais e 47,2% das emissões de dióxido de carbono em relação ao sistema convencional. Enquanto a trigeração tradicional, compatível com consumo elétrico da instalação sem a contribuição do gerador fotovoltaico, mostrou-se economicamente inviável, devido ao consumo e tarifa do gás natural. Os resultados apontam que gerar parte da energia elétrica em painéis fotovoltaicos, compatibilizar o despacho da trigeração com o período de maior demanda de água gelada e horário de ponta estabelecido pela distribuidora de energia elétrica (CPFL, 2020), foram fatores determinantes para a viabilidade técnica, econômica e ambiental da proposta.

## Abstract

*Motivated by the growing energy demand and risks of shortages in the post-pandemic, this development evaluated the technical, economic and environmental feasibility of a natural gas trigeneration plant associated with a on grid photovoltaic system, for electricity, chilled and hot water generations in the pharmaceutical industrial sector. The study was based on a hybrid generation model, called the basic scenario, and four alternatives, three being hybrids and a traditional natural gas trigeneration. Simulators of cogeneration processes and photovoltaic systems were used, varying the operating time of the generator and the number of photovoltaic modules, as well as the association with hot water and direct fired absorption chillers. The results in terms of energy efficiency and carbon dioxide emission were favorable for all the studied scenarios, while the economic indicators lost attractiveness increasing the generator operating time, as well as with the reduction of energy generated in panels photovoltaics. The hybrid plant in the basic scenario proved to be technically and financially viable, with the generator operating 8 hours a day, a photovoltaic system at full power and hot water storage for sanitary use. It resulted in an energy use factor of 72.9%, an internal rate of return of 15.8%, in addition to reductions of 38.3% in operating costs and 47.2% in carbon dioxide emissions compared to the conventional system. While traditional trigeneration, compatible with the installation's electrical consumption without the contribution of the photovoltaic generator, proved to be economically unfeasible, due to the consumption and tariff of natural gas. The results show that generating part of the electricity in photovoltaic panels, making the dispatch of trigeneration compatible with the period of greatest demand for chilled water and grid electric peak hours, were determining factors for the technical, economic and environmental feasibility of the proposal.*

## 1 Introdução

A demanda global de energia cresceu 2,3% em 2018, sendo este o maior aumento anual desde 2010. China, Estados Unidos e Índia foram responsáveis por 70% do crescimento da demanda total de energia. Apesar do crescimento das energias renováveis ter ultrapassado as taxas de crescimento das outras formas de geração desde 2010, a participação dos combustíveis fósseis na demanda global de energia primária permanece acima de 80%. Em 2019, em um cenário conservador, foi previsto crescimento médio da demanda energética anual de 1 % até 2040, ou seja, abaixo do realizado em 2018, mostrando que a economia global e a demanda por energia seguem caminhos divergentes, devido ao uso menos intensivo de energia para a fabricação de bens, ganhos de eficiência energética e efeitos de saturação, especialmente em termos de uso de veículos (IEA, 2019).

Para o período de 2020 a 2030, espera-se que à medida que o mundo supere os bloqueios da pandemia da Covid-19, o consumo de energia do segmento industrial retorne aos níveis pré-crise até 2022, enquanto o consumo de energia nos transportes e edifícios comerciais devem demorar um pouco mais, permanecendo abaixo dos níveis anteriores até 2023. Por outro lado, o consumo de energia das residências aumentou em 2020, ocasionado pela mudança do local de trabalho dos escritórios para as residências, tendo em vista a não proliferação do vírus. Em 2025, o consumo total de energia deverá permanecer abaixo das trajetórias pré-crise, mas retomará a taxa de crescimento de 1,2% para o restante da década, portanto, consistente com as projeções pré-pandemia (IEA, 2020).

Espera-se que o PIB (Produto Interno Bruto) mundial cresça em média, 3,3% ao ano, e o brasileiro a uma taxa de 2,9%, no período de 2021 a 2031 (EPE, 2021.b). No Brasil, espera-se a expansão do consumo de energia elétrica a uma taxa média de 3,5% ao ano e o gás natural a 3% ao ano, ao longo do decênio de 2021 a 2031 (EPE, 2021.c; EPE, 2021.d).

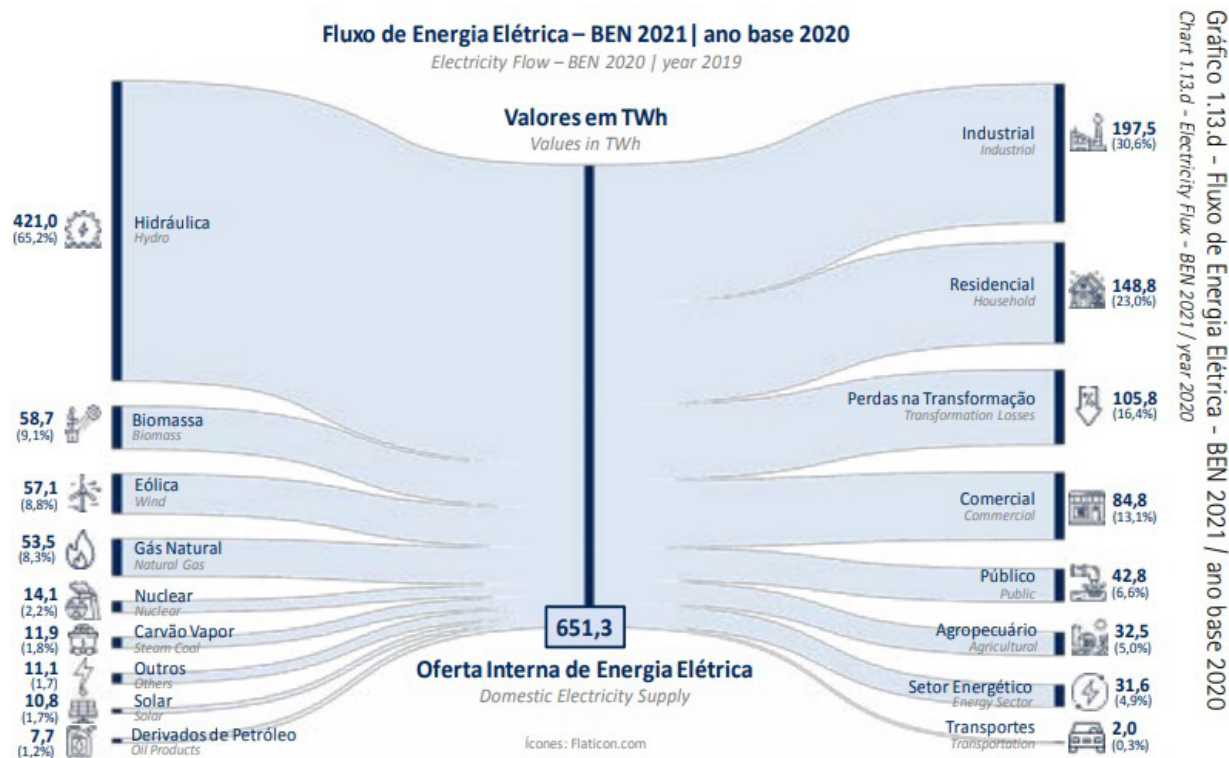
A **Figura 1**, mostra que a geração elétrica brasileira é predominantemente renovável, representando 80,4% da oferta interna de eletricidade, resultante de 65,2% das hidráulicas, 8,2% de biomassa e 6,8% de fontes eólicas e 1,7% de origem fotovoltaica. Apesar dos altos níveis de irradiação solar incidentes no país, a geração fotovoltaica apresenta pequena contribuição na matriz elétrica, o que por si só evidencia o potencial de expansão dessa tecnologia. Do lado do consumo, o segmento industrial representou 30,6% de toda energia elétrica gerada no país em 2020, bem como as perdas existentes na transformação chegam a 16,4% do total gerado (EPE, 2021a).

No Brasil, considerando o cenário de crescimento da demanda elétrica discutido anteriormente, a forte dependência da geração hidráulica, índices pluviométricos irregulares e limitada capacidade de armazenamento das usinas hidrelétricas recentemente construídas, torna-se necessário a entrada em operação das térmicas utilizando combustíveis fósseis para suprir a demanda nacional não atendida. A estratégia utilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), traz como externalidades a maior emissão de dióxido de carbono e cobrança adicional nas tarifas, as chamadas

bandeiras tarifárias, que têm como objetivo recuperar os elevados custos de operação das térmicas a base de combustíveis fósseis, em comparação com a geração hidráulica. Em agosto de 2021 o Ministério das Minas e Energia, elevou o patamar da bandeira de escassez hídrica vermelha em 49,6 %, passando de R\$ 9,49 para R\$14,20 a cada 100 kWh consumido (MME, 2021).

Nesse contexto de incertezas e tarifas elevadas, o presente artigo se concentra em configurar usina híbrida composta por trigeração a gás natural associada a resfriadores de líquidos por absorção e gerador fotovoltaico, para produção de energia elétrica, água gelada e parte da água quente consumida em indústria farmacêutica em operação no sudeste brasileiro. Cinco alternativas foram configuradas e simuladas, sendo quatro híbridas, compostas por motogerador a gás natural associado a resfriadores por absorção e gerador fotovoltaico conectado à rede, e uma pura, composta apenas por motogerador a gás natural associado a resfriadores por absorção. É objetivo central do artigo comparar as cinco soluções propostas com um sistema convencional dependente da rede de distribuição de eletricidade, em termos de eficiência energética, viabilidade econômica e emissão de dióxido de carbono.

Figura 1 – Fluxo nacional de energia elétrica

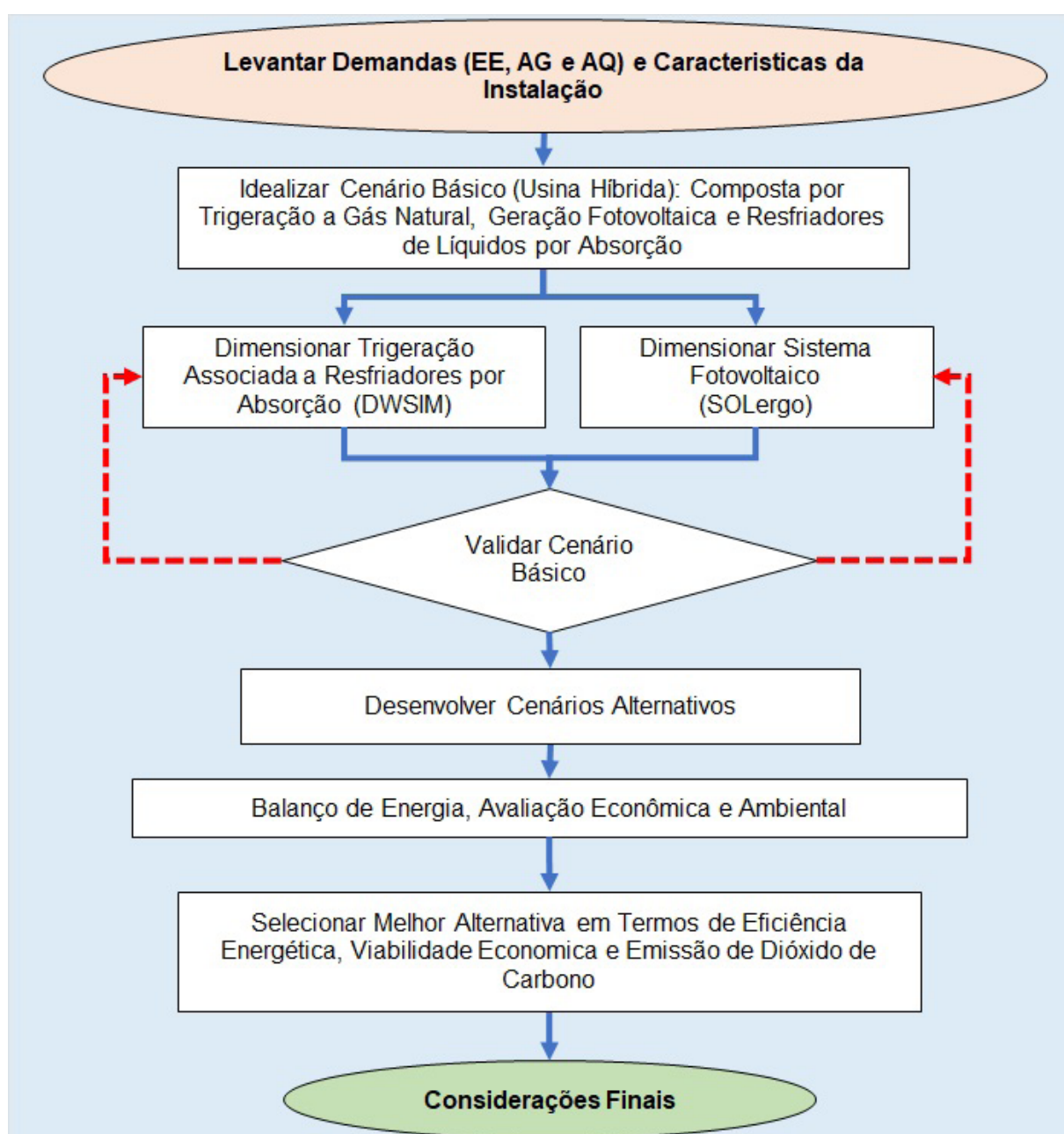


Fonte: EPE (2021a).

## 2 Geração Híbrida De Energia: Configuração E Simulação

O estudo foi desenvolvido com base nas demandas energéticas da indústria, no entanto, o conceito pode ser replicado para outros setores demandantes de eletricidade, aquecimento e resfriamento.

Figura 2 - Etapas do processo de pesquisa



Fonte: elaborado pelos autores

Como ilustrado no fluxograma da **Figura 2**, o trabalho se iniciou com o levantamento das características e demandas da instalação, seguido da idealização de modelo híbrido baseado nas tecnologias de trigeriação a gás natural e geração fotovoltaica conectada à rede. Em seguida, foi dimensionamento o sistema híbrido com auxílio de simuladores de processos e projeto fotovoltaico. Conclui-se o estudo com a inclusão de cenários alternativos, balanços, análises dos resultados e escolha da solução mais adequada para a instalação, juntamente com as considerações finais que justificam tais caminhos.

Para o dimensionamento da trigeriação a gás natural do presente estudo, foi utilizado o simulador de processos químicos para regime estacionário, DWSIM 7.1.1 (Open Source Process Simulator), identificado como o ambiente que mais se assimilou aos simuladores comerciais, e para o projeto fotovoltaico, foi empregado o software SOLergo, na versão 2022.

Os cenários, atual e propostos para produzir as três formas de energia consumidas na fábrica (eletricidade, água quente e água gelada), apresentam as seguintes composições:

**Cenário Convencional (CC):** no modelo atual de suprimento energético, a energia elétrica da rede atende as cargas elétricas em geral, bem como movimenta os resfriadores elétricos para produzir a água gelada consumida pelo ar-condicionado central. A água quente para aquecimento de processos é produzida em gerador a gás combustível convencional, enquanto a água quente de baixa temperatura para fins sanitários é gerada em aquecedores elétricos no ponto de uso;

**Cenário Básico (CB):** composto por motogerador a gás natural previsto para operar a plena carga 8 horas por dia, bem como integrado a um sistema fotovoltaico com potência compatível com a demanda elétrica contratada. A água gelada será produzida em resfriadores por absorção do tipo água quente cogenerada e queima direta de gás natural. O calor recuperado e não utilizado pelo resfriador, será aproveitado para aquecimento de processos e produção de água quente para uso sanitário. Além disso, considera-se manter um pequeno consumo de energia elétrica da concessionária.

**Cenários Alternativos (CA-01, CA-02, CA-03 e CA-04):** foram desenvolvidos a partir da configuração básica, no entanto, com variação do tempo de operação diária do motogerador (3, 10, 12 e 13 horas respectivamente), além da redução da potência instalada do sistema fotovoltaico para evitar excedentes de eletricidade.

## 2.1 Demandas energéticas

O estudo se baseou em unidade industrial farmacêutica em funcionamento no sudeste brasileiro com manufatura em ambientes controlados e não controlados. A água gelada utilizada pelos sistemas de ar-condicionado é produzida em resfriadores elétricos do tipo

parafuso com condensação a água. As demandas energéticas (energia elétrica, água gelada e água quente) foram estimadas com base no projeto da planta e regime operacional da central de água gelada (CAG).

### Funcionamento da indústria

24 horas por dia, 5 dias por semana e 260 dias por ano;

### Energia Elétrica

Potência elétrica contratada: fora de ponta: 1.100 kW / ponta: 1.000 kW;

Consumo elétrico fora de ponta: 3.870 MWh/ano;

Consumo elétrico na ponta: 640 MWh/ano;

Consumo elétrico total: 4.508 MWh/ano;

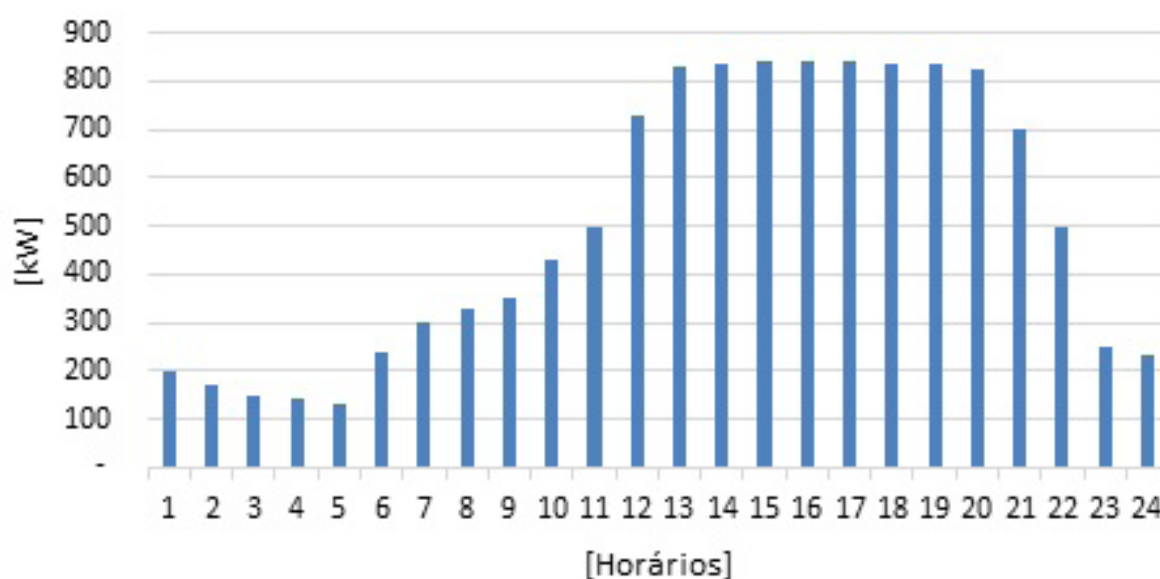
### Água Gelada

Capacidade térmica instalada (resfriadores elétricos): 1.030 kW;

Consumo térmica anual: 3.127.800 kWh/ano;

Demanda térmica horária máxima: 950 kWh/h.

Figura 3 – Perfil de Carga Térmica



Fonte: dados da unidade fabril obtidos pelo autor

### Água Quente de Processos

Demanda horária máxima: 100 kWh/h;  
Consumo térmico (AQ) anual: 624 MWh/ano;  
Consumo de gás natural estimado: 78.000 Nm<sup>3</sup>/ano;  
Eficiência do gerador de água quente: 80%;  
PCI estimado para gás natural: 8600 kcal/h.

### Água Quente de Uso Sanitário (aquecimento elétrico)

Consumo anual de energia elétrica: 98 MWh/ano.

## 2.2 Modelo proposto: geração híbrida de energia elétrica e térmica

A trigerção híbrida de energia proposta se baseia em duas tecnologias para suprimento da demanda energética da instalação, sendo uma trigerção a gás natural e um sistema fotovoltaico conectado à rede. Conceitualmente, a trigerção é usada para produzir energia elétrica, e simultaneamente fornecer energia térmica para aquecimento e resfriamento, por meio da recuperação da energia térmica contida nos gases da combustão, que de outra forma seria direcionado para a atmosfera (Rocha, M.S et al., 2012). Enquanto a conversão fotovoltaica transforma parte da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica. O efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade (ZILLES, R. et al, 2012).

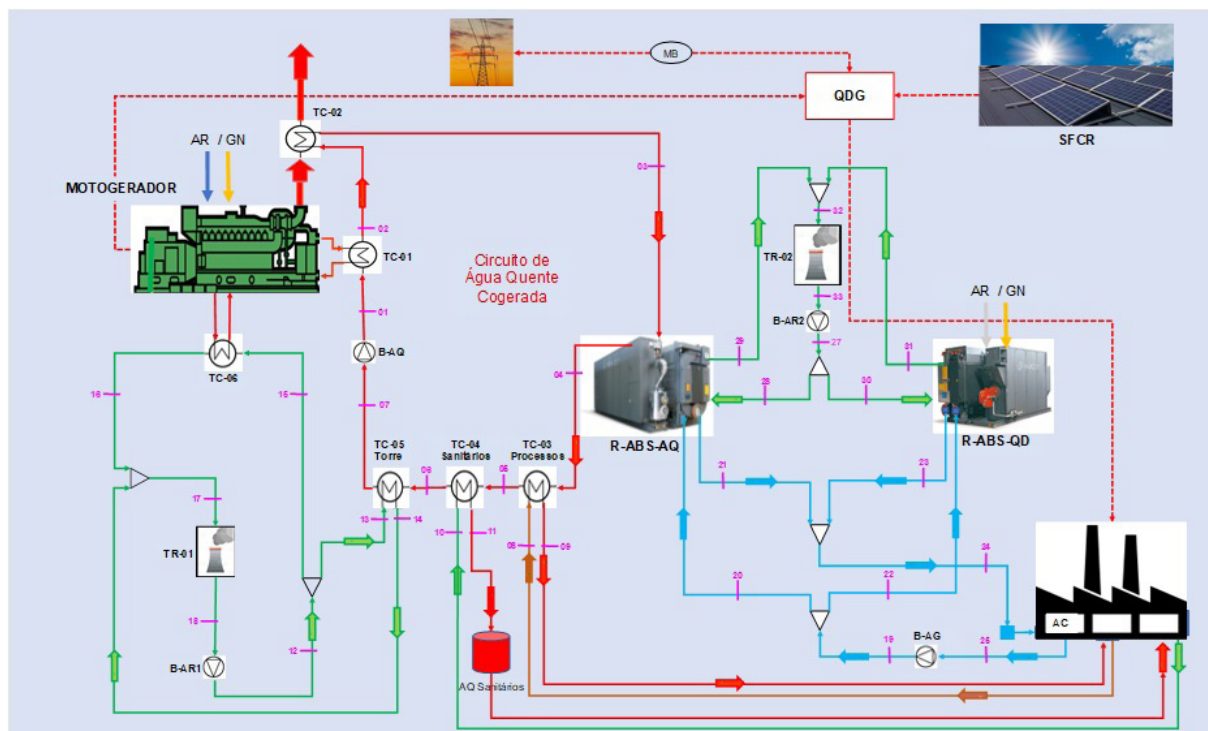
A trigerção híbrida idealizada (**Figura 4**) é composta por um motogerador a gás natural, trocador de calor para resfriamento do bloco, óleo e primeiro estágio do intercooler do gerador (TC-01), recuperador do calor contido nos gases da exaustão (TC-02), resfriador por absorção do tipo água quente cogeração (R-ABS-AQ), trocador de calor para produção de água quente de processos (TC-03), trocador de calor para geração de água quente baixa temperatura para fins sanitários (TC-04), reservatório de armazenamento de água quente para uso humano, trocador de calor destinado a remover o calor em excesso do circuito de água quente cogeração (TC-05) e dissipar na torre de resfriamento (TR-01), além do trocador de calor para resfriamento do segundo estágio do intercooler do motogerador (TC-06).

Inclui no modelo proposto da **Figura 4**, um resfriador por absorção para operar com queima direta de gás natural (R-ABS-QD) para suprir a demanda de água gelada não atendida pela trigerção, além de incrementar confiabilidade e flexibilidade operacional ao sistema.

Ainda na **Figura 4**, uma segunda torre (TR-02) é utilizada para resfriamento do absorvedor e condensador dos resfriadores de líquidos da planta. O modelo proposto considera que a energia elétrica produzida no motogerador e sistema fotovoltaico (SFCR) serão injetadas no quadro elétrico geral da fábrica (QDG), podendo ser utilizada na fábrica ou seguir para a rede da concessionária. E por

fim, o medidor bidirecional (MB) da **Figura 4**, tem a função de contabilizar a energia elétrica entregue e recebida da rede da concessionária. Conforme Zilles et al. (2012), o medidor bidirecional faz o balanço entre a energia que flui da edificação para a rede elétrica e da rede para a edificação, permitindo que a energia excedente produzida localmente seja descontada do total tarifado pela concessionária.

**Figura 4 – Modelo Proposto – Trigeração Híbrida de Energia**



Fonte: elaborado pelo autor.

### 2.3 Simulação da trigeração a gás natural

A simulação envolve métodos iterativos em um processo de regime estacionário. Os resultados variam com a quantidade de energia térmica disponibilizada pelo motor gerador (sistema de refrigeração e gases da exaustão), demandas térmicas pré-estabelecidas para o resfriador de líquido e trocadores de calor, bem como as eficiências desses equipamentos. A simulação foi desenvolvida por meio do software aberto DWSIM 7.1.1, seguindo as correntes e interligações estabelecidas no modelo proposto na **Figura 4**.

## Motogerador a gás natural selecionado

Tabela 1: Parâmetros do motogerador selecionado

Item	Parâmetro	Motogerador
1	JENBACHER – Gas Reciprocating Engine – 60 Hz	J-320
2	Combustível	Gás Natural
3	RPM (rotações por minuto)	1800
3	Energia do Gás Natural	2.715 kW
3	Potência elétrica	1062 kW
4	Energia térmica total	1360 kW
5	Energia refrigeração (1° est. Inter., óleo e bloco)	661 kW
6	Energia dos gases da exaustão	663 kW
7	Eficiência elétrica	39,4 %
8	Eficiência térmica	50,4 %
9	Eficiência global	89,8 %
10	Cilindros V 70°: diâmetro 135mm x 170 mm de curso	20 cilindros

Fonte: adaptado (GE,2009 e INNIO, 2020)

A Tabela 1 mostra os principais parâmetros do motogerador, levando em conta os requisitos de potência elétrica, consumo de eletricidade da instalação e demanda térmica. Para o cenário básico foi imposto para o motogerador funcionar 8 horas por dia. A validação da potência térmica disponível foi realizada por simulação com auxílio do software de processos DWSIM 7.1.1, como mostra o balanço termodinâmico da Tabela 2.

**Resfriadores por absorção selecionados:** a Tabela 2, nas linhas de fluxos 20 e 21, indica que o resfriador de absorção do tipo água quente cogeração de 1.100 kW da fabricante Indiana Thermax, atende à condição de demanda máxima de água gelada da instalação. Para produção da demanda de água gelada com a cogeração fora de operação, foi selecionado um resfriador por absorção do tipo queima direta de gás natural da fabricante chinesa BROAD, com a mesma capacidade de resfriamento, de modo a atender a demanda máxima do ar-condicionado, além de agregar flexibilidade e confiabilidade operacional à CAG (central de água gelada).

### Resultados da simulação

A simulação foi realizada considerando a condição de demanda térmica máxima, tanto para resfriamento quanto para aquecimento. Também foi premissa para realização do balanço termodinâmico, utilizar apenas o resfriador por absorção tipo água quente, deixando o resfriador tipo queima direta na condição *stand-by*.

A **Tabela 2** mostra na primeira coluna da esquerda para a direita as correntes de fluxo, conforme apresentado no fluxograma da **Figura 4**. A **Tabela 2** indica também os equipamentos, temperatura (T), pressão (P), volume mássico (m), variação de entalpia ( $\Delta h$ ) e na última coluna da direita o fluxo térmico total por equipamento (Q).

Os resultados da simulação da tabela 2, a qual se baseou fielmente na **Figura 4**, mostram que uma parte do calor contido no fluido de refrigeração e gases da exaustão é transferida para o circuito de água cogenerada através dos trocadores TC-01 e TC-02 respectivamente, elevando a temperatura da água para 87,68°C. Essa água agora aquecida, fornece calor para o ciclo de absorção do resfriador (R-ABS-AQ), bem como aquece processos (TC-03), gera água quente baixa temperatura para fins sanitário (TC-04), e o excesso de calor é direcionado para o meio ambiente através do trocador de calor (TC-05) e torre de resfriamento (TR-01). O calor contido no sistema de refrigeração do 2º estágio do *intercooler* (TC-06), não fornece calor para circuito de água quente cogenerada, como mostra a **Figura-5**, bem como as linhas de fluxos 15 e 16 do balanço termodinâmico da **Tabela 2**.

**Tabela 2: Balanço termodinâmico da trigerção a gás natural**

Balanço Termodinâmico da Trigerção a Gás Natural						
Fluxos	Equipamentos	T (°C)	P(bar)	m (kg/s)	$\Delta h$ [kJ/kg]	Q [kW/h]
01	TC-01:Refrigeração motogerador	80,02	4,50	34,28	18,32	627,9
02		84,06	4,00	34,28		
02	TC-02: Gases da exaustão motogerador	84,06	4,00	34,28	16,45	563,8
03		87,68	3,50	34,28		
03	R-ABS-AQ: Refriador AQ Cogenerada	87,68	3,50	34,28	- 28,27	- 969,0
04		81,48	3,00	34,28		
04	TC-03: AQ processos	81,48	3,00	34,28	- 2,92	- 100,0
05		80,84	2,50	34,28		
05	TC-04: AQ uso sanitário	80,84	2,50	34,28	- 1,37	- 47,1
06		80,55	2,00	34,28		
06	TC-05: Remoção do excesso de calor	80,55	2,00	34,28	- 2,63	- 90,1
07		79,98	1,50	34,28		
07	B-AQ: Bomba AQ	79,98	1,50	34,28	0,42	14,4
01		80,01	4,50	34,28		
08	Fluxo de AQ para processos	60,00	4,00	1,39	72,00	100,0
09		79,65	3,50	1,39		
10	Fluxo de AQ uso sanitário	25,00	2,00	0,37	127,50	47,1
11		62,00	1,50	0,37		
12	Distribuidor: Água resfriamento	29,50	3,0	7,22	0,00	0,0
13		29,50	3,0	2,57		
15		29,50	3,0	4,65		
13	TC-05: Água de resfriamento torre 1	29,50	3,0	4,65	19,35	90,0
14		33,81	2,5	4,65		

Balanço Termodinâmico da Trigeração a Gás Natural						
Fluxos	Equipamentos	T (°C)	P(bar)	m (kg/s)	$\Delta h$ [kJ/kg]	Q [kW/h]
15	TC-06: Resfriamento intercooler	29,50	3,0	2,57	18,49	47,5
16		33,61	2,5	2,57		
14	Misturador: Misturador água para TR-01	33,81	2,5	4,65	0,00	0,0
16		33,61	2,5	2,57		
17		33,74	2,5	7,22		
17	TR-01: Torre de resfriamento 01	33,74	2,5	7,22	-19,34	-139,7
18		29,49	0,5	7,22		
18	B-AR1: Bomba TR-01	29,49	0,5	7,22	0,30	2,2
12		29,50	3,0	7,22		
19	Distribuidor: AG para resfriador	11,03	4,00	41,67	0,00	0,0
20		11,03	4,00	41,67		
22		11,03	4,00	0,00		
20	R-ABS-AQ: Resfriador por absorção AQ	11,03	4,00	53,05	-18,26	-968,7
21		7,00	3,50	53,05		
22	R-ABS-QD: Resfriador absorção QD	<i>Condição Stand-by</i>				
23						
21	Misturador: AG para fábrica	7,00	4,00	53,05	0,00	0,0
23		0,00	0,00	0,00		
24		7,00	3,50	53,05		
24	AC: Ar condicionado da fábrica	7,00	3,50	53,05	17,91	950,1
25		11,02	1,00	53,05		
25	B-AG: Bomba de AG	11,02	1,00	53,05	0,35	18,6
19		11,03	4,00	53,05		
27	Distribuidor: Água de resfriamento (AR)	29,50	3,50	87,35	0,00	0,0
28		29,50	3,50	87,35		
30		0,00	0,00	0,00		
28	R-ABS-AQ: Resfriador absorção AQ	29,50	3,50	87,35	21,97	1919,0
29		34,40	2,50	87,35		
30	R-ABS-QD: Resfriador absorção QD	<i>Condição Stand-by</i>				
31						
29	Misturador: AR vai para TR-02	34,40	2,50	87,35	0,00	0,0
31		0,00	0,00	0,00		
32		34,40	2,50	87,35		
32	TR-02: Torre de resfriamento 02	34,40	2,50	87,35	-22,33	-1950,5
33		29,48	0,50	87,35		
33	B-AR2: Bomba AR 2	29,48	0,50	87,35	0,36	31,4
27		29,50	3,50	87,35		

Fonte: elaborado pelo autor (Com auxílio do DWSIM – Versão 7.1.1)

Ainda sobre os resultados da simulação demonstrados na **Tabela 2**, verifica-se a água gelada retornando do ar-condicionado a temperatura de 11,06°C pelo fluxo 25 e sendo bombeada em direção ao resfriador por meio das correntes 19 e 20, onde ocorre a redução da temperatura para 7°C, e agora como água resfriada segue para as serpentinas do ar-condicionado pelas correntes de fluxo 21 e 24, onde ganha temperatura e fecha o ciclo.

A **Tabela 2** mostra também que a água resfriamento na temperatura de 27,5°C sai da bacia da torre através da corrente de fluxo 33, é bombeada e segue pelas correntes 27 e 28 até o resfriador, onde remove parte do calor do absorvedor e condensador e retorna para a torre por meio do fluxo 29, para resfriar e iniciar novo ciclo.

Concluindo a descrição do processo de simulação, a **Tabela 2** mostra o resfriador de absorção tipo queima direta na condição stand-by (fora de operação), sendo possível observar a inexistência de fluxos de água gelada nas correntes 22 (entra) e 23 (sai), bem como nas correntes da água de resfriamento 30 (entra) e 31 (sai), indicando que as válvulas de controle de fluxo dessas correntes de massa foram fechadas pelo sistema de automação da planta de energia.

**Tabela 3: Balanço de Energia – Trigerção**

Balanço de Energia – Trigerção		
Parâmetros	kWh/h	% [Item / total]
Energia do gás natural que entra no motogerador	2,715.0	100.0%
Energia elétrica gerada	1,062.0	39.1%
Energia térmica da AG 7°C produzida	950.0	35.0%
Energia térmica - AQ procesos	100.0	3.7%
Energia térmica - AQ sanitária	47.1	1.7%
FUE (fator de utilização de energia) = $(W+Q_u) / Q_c$	-	<b>79.5%</b>

Fonte: elaborada pelo autor

A **Tabela 3** resume o balanço de energia e rendimento energético da planta de trigerção, destinada a produção combinada de energia elétrica, água gelada e água quente, na condição de demanda térmica máxima da instalação.

## 2.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede

O gerador fotovoltaico indicado na **Figura 4**, foi dimensionado considerando que a somatória das potências dos inversores deverá estar limitada a nova demanda contratada (935 kW). A produção de energia do sistema fotovoltaico foi estimada com auxílio do Software SOLergo 2022, levando em conta os fatores referentes a irradiação solar e temperatura da localidade, orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos, efeitos de sombra próxima e distante do plano gerador, eficiência dos inversores, riscos de sujidades das células fotovoltaicas e perda de eficiência dos módulos, bem como perdas em conexões e cabearmentos elétricos.

Foi observado também os requisitos das resoluções normativas, as quais estabelecem os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 3, da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), juntamente com os procedimentos e condicionantes da concessionária local para acesso à rede, considerando a classe e nível de tensão da conexão da instalação.

**Tabela 4: Parâmetros do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede – Cenário Básico**

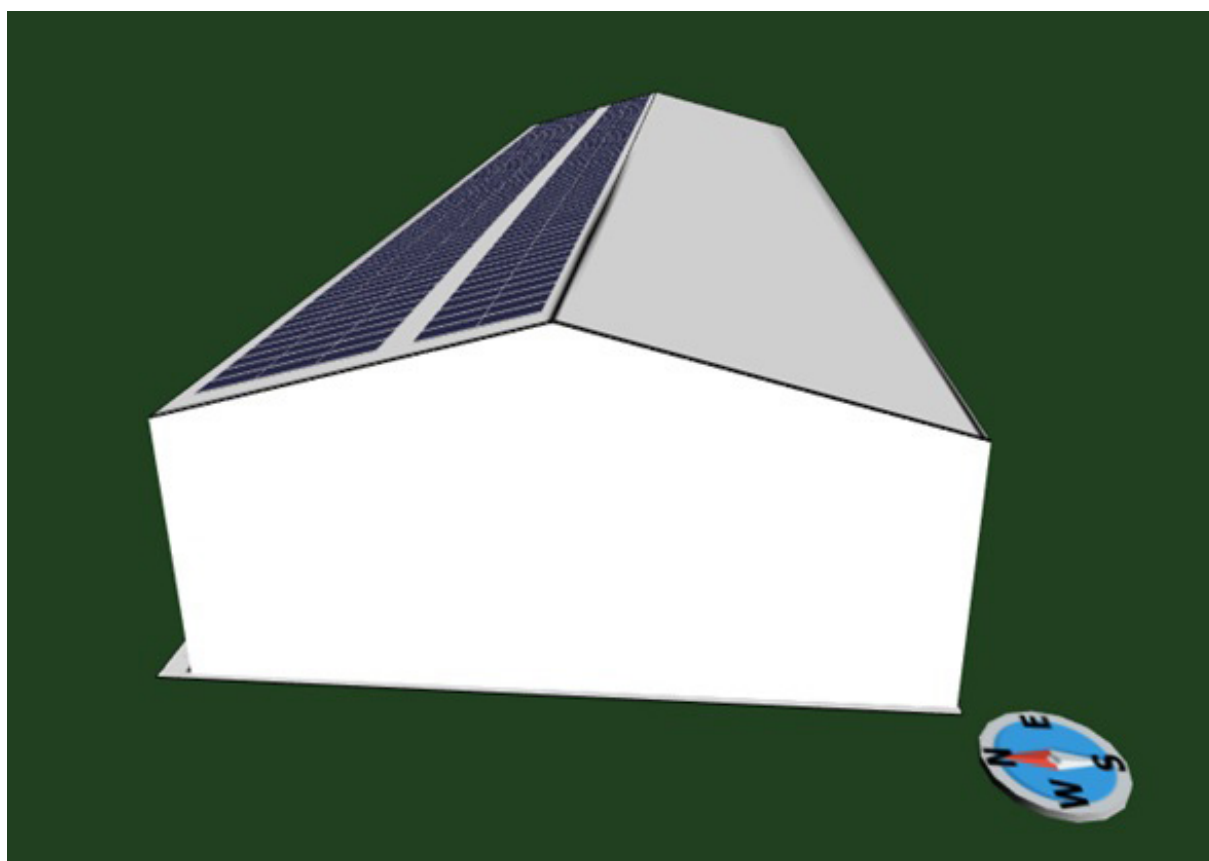
Parâmetros do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede – Cenário Básico	
Potência de pico instalada;	1.040 kW
Potência simulada para os inversores:	880 kW
Irradiação solar no plano inclinado (CRESESB, 2020)	4,6 kWh/m <sup>2</sup> . dia
GE(SFCR) Produção de energia elétrica	1.437 MWh / ano
Oito (8) subsistemas 325 módulos	2.600 módulos
Potência de pico cada módulo fotovoltaico monocristalino	400 W
Área de exposição por painel fotovoltaico	1,978 x 0,999 = 1,98m <sup>2</sup>
Área de exposição total dos painéis fotovoltaicos	2600 x 1,98 = 5.148 m <sup>2</sup>
Área de telhado requerida:	6.720 m <sup>2</sup>
Quantidade de inversores 100 kW, 380 Vac, 60 HZ	8 inversores
Desempenho geral do gerador	0,82
Fator de dimensionamento do inversor	0,77

Fonte: elaborada pelo autor

A **Tabela 4** mostra os principais parâmetros e resultados do sistema fotovoltaico dimensionado com auxílio do SOLergo 2022, tais como, a potência de pico, potência calculada dos inversores, irradiação no plano inclinado, quantidade e potência dos módulos fotovoltaicos, fator de dimensionamento do inversor (FDI), área de telhado, bem como a energia produzida e eficiência do sistema.

Dentre os fatores que afetam o custo-benefício do projeto fotovoltaico, aparece o fator de dimensionamento do inversor. O FDI é uma razão entre a potência nominal do inversor e a potência de pico do gerador, e de forma geral, os valores de FDI recomendados por fabricantes situam-se na faixa de 0,75 a 0,85. (CRESESB, 2014).

**Figura 5: Layout Gerador Fotovoltaico Conectado à Rede**



Fonte: elaborada pelo autor (Com auxílio do SOLergo, 2022)

A **Figura 5** ilustra um subsistema com 325 módulos de 400 W (monocristalino) arranjados em prédio com cobertura metálica, e um inversor de 100 kW, sendo que o gerador do estudo é composto por oito subsistemas similares, totalizando 2600 módulos e 8 inversores, como informado na **Tabela 4**. O espaço livre entre a terceira e quarta fileiras de módulos mostrada na **Figura 5**, visa facilitar o acesso para limpeza, inspeção e manutenção dos módulos e conexões do circuito de corrente contínua.

## 3 Discussão dos Resultados

As análises e discussões se baseiam em resultados dos estudos básico e alternativos, com o propósito de selecionar a melhor configuração para geração de energia elétrica e térmica em indústria do setor farmacêutico do sudeste brasileiro. As análises dos cenários se darão em termos de eficiência energética, viabilidade econômica e emissão de dióxido de carbono, tendo como referência um cenário convencional (CC), o qual tem forte dependência da rede da concessionária.

### 3.1 Eficiência Energética:

Conteúdo da **Tabela 5**, por energético:

**EE (Energia Elétrica):** Nova demanda contratada exclui a carga dos resfriadores elétricos e inclui as cargas das novas instalações. O balanço anual reflete o novo consumo, bem como a produção do motogerador e sistema fotovoltaico. A pequena quantidade de energia importada da rede fecha o balanço anual.

**GN (Gás Natural):** O total consumido na usina é resultante do gás natural utilizado no motogerador operando a plena carga, queima direta em resfriador de absorção e produção de água quente a partir de vapor da caldeira.

**AG (Água Gelada):** Com o motogerador operando, a totalidade da água gelada demandada pelo sistema de ar-condicionado será produzida em resfriador tipo água quente cogeração. O Resfriador tipo queima direta atende as demandas adicionais.

**AQ (Água Quente) de processos:** Com o motogerador em funcionamento, o calor para aquecimento de processo será produzido a partir da água quente cogeração.

**AQ (Água Quente) uso sanitário:** A totalidade da água quente para fins sanitários será produzida a partir de rejeitos térmicos, reduzindo o consumo de energia elétrica.

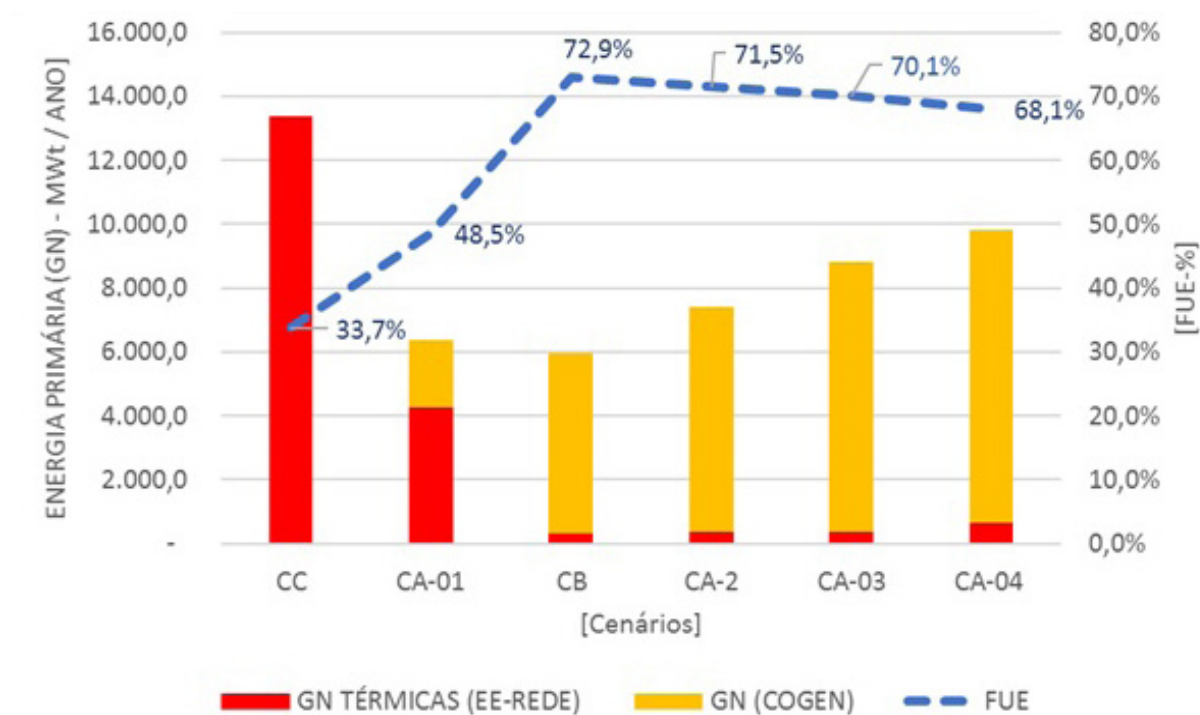
**FUE (Fator de Utilização de Energia) global:** É um balanço da geração local e energia importada da rede para cada cenário.

Tabela 5: Balanço energético geral

BALANÇO GERAL DE ENERGIA : TODOS OS CENÁRIOS								
Item	Parâmetros	Unidades	CC	CA-01	CB	CA-2	CA-03	CA-04
1	Horas/Dia de Motogerador a Plena Carga	[Horas/Dia]	0,0	3,0	8,0	10,0	12,0	13,0
2	<b>Demanda Elétrica Contratada</b>							
2.1	Horário de ponta: tarifa azul	[kW]	1.000,0	-	-	-	-	-
2.2	Horário fora de ponta: tarifa azul		1.100,0	-	-	-	-	-
2.3	Nova demanda elétrica calculada: tarifa única verde		-	935,0	935,0	935,0	935,0	935,0
3	<b>Consumo energia elétrica concessionária</b>	[MWh/ano]	<b>4.508,4</b>	<b>1.440,2</b>	<b>109,0</b>	<b>113,4</b>	<b>117,9</b>	<b>214,6</b>
4	<b>Geração de energia elétrica (EE)</b>		-	<b>2.263,0</b>	<b>3.639,7</b>	<b>3.653,4</b>	<b>3.667,1</b>	<b>3.579,4</b>
4.1	Motogerador a gás natural (We)	[MWh/ano]	-	826,0	2.202,7	2.753,4	3.304,1	3.579,4
4.2	Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR)		-	1.437,0	1.437,0	900,0	363,0	-
5	<b>Consumo de gás natural (GN)</b>	[Nm³/ano]	<b>78.000,0</b>	<b>455.411,7</b>	<b>715.452,5</b>	<b>826.602,8</b>	<b>941.519,1</b>	<b>1.001.493,3</b>
5.1	Motogerador		-	211.800,0	564.800,0	706.000,0	847.200,0	917.800,0
5.2	Resfriador ABS QD		-	175.361,7	98.652,5	75.602,8	55.319,1	47.943,3
5.3	Caldeira Convencional		78.000,0	68.250,0	52.000,0	45.000,0	39.000,0	35.750,0
6	<b>Produção água gelada (AG)</b>	[MWh/ano]	<b>3.127,8</b>	<b>3.127,8</b>	<b>3.127,8</b>	<b>3.127,8</b>	<b>3.127,8</b>	<b>3.127,8</b>
6.1	Resfriadores Elétricos		3.127,8	-	-	-	-	-
6.2	Resfriador ABS AQ		-	655,2	1.736,8	2.061,8	2.347,8	2.451,8
6.3	Resfriador ABS QD		-	2.472,6	1.391,0	1.066,0	780,0	676,0
7	<b>Produção água quente de processos (AQ-P)</b>	[MWh/ano]	<b>624,0</b>	<b>624,0</b>	<b>624,0</b>	<b>624,0</b>	<b>624,0</b>	<b>624,0</b>
7.1	Caldeira Convencional: vapor de planta		624,0	546,0	416,0	364,0	312,0	286,0
7.2	Trocador de Calor: AQ cogeração		-	78,0	208,0	260,0	312,0	338,0
8	<b>Produção água quente para uso sanitário (AQ-S)</b>	[MWh/ano]	<b>98,2</b>	<b>98,2</b>	<b>98,2</b>	<b>98,2</b>	<b>98,2</b>	<b>98,2</b>
8.1	Chuveiros e torneiras elétricas		98,2	-	-	-	-	-
8.2	Trocador de Calor: AQ cogeração		-	98,2	98,2	98,2	98,2	98,2
<b>Memória de Cálculo: Eficiência Energética Global</b>								
9	FUE da energia elétrica da rede	[%]	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%	33,7%
10	FUE da COGEN = (We+Qu) / (Energia GN)		-	78,3%	75,2%	73,3%	71,6%	70,5%
11	<b>Energia primária consumida</b>	MWh/ano	<b>13.370,1</b>	<b>6.388,9</b>	<b>5.971,1</b>	<b>7.396,3</b>	<b>8.821,7</b>	<b>9.814,4</b>
11.1	GN consumido na térmica: energia elétrica da rede		13.370,1	4.270,9	323,1	336,3	349,7	636,4
11.2	GN consumido na TRIGERACÃO: energia el. e térmica gerada		-	2.118,0	5.648,0	7.060,0	8.472,0	9.178,0
12	<b>FUE Global = (Rede + Trigeracão)</b>	[%]	<b>33,7%</b>	<b>48,5%</b>	<b>72,9%</b>	<b>71,5%</b>	<b>70,1%</b>	<b>68,1%</b>

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 6: utilização de energia primária (GN)



Fonte: elaborada pelo autor (Com auxílio do SOLergo, 2022)

A **Figura 6**, relaciona o FUE (fator de utilização de energia) dos cenários com o gás natural consumido nas térmicas centralizadas e na planta de trigeriação do estudo. Para o cálculo do FUE das térmicas foi adotado eficiência de 40% e perdas na geração de 16,4% (EPE, 2021a). A configuração do cenário básico (CB) indica o maior FUE aparente, reflexo do baixo consumo de energia da rede e geração em painéis fotovoltaicos de 38,3% do total da energia consumida. A água gelada corresponde mais de 80% da demanda térmica total da fábrica, portanto, foi fundamental compatibilizar o despacho da trigeriação associada a resfriador de água utilizando rejeitos térmicos, com o período de maior demanda de água gelada para maximização da eficiência energética do sistema.

Com a energia gerada em painéis fotovoltaicos, foi possível reduzir o tempo de operação do motor-gerador sem incrementar o consumo de energia da rede. A equação do fator de utilização de energia mostra que a variação no percentual de utilização da energia térmica disponível reflete diretamente na eficiência da planta, portanto, reduzir a demanda de energia térmica, reduzirá o FUE da proposta.

## 3.2 Balanço Econômico Geral

Tabela 6: Balanço Econômico Geral

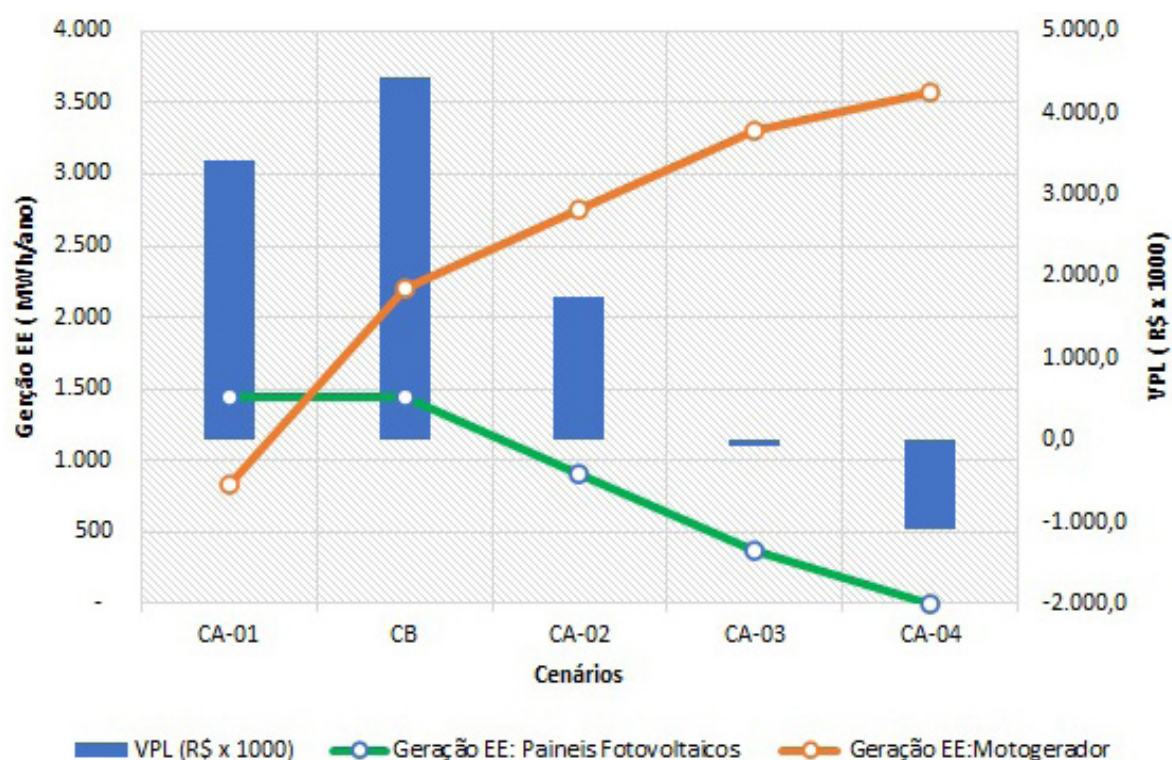
BALANÇO ECÔNOMICO GERAL								
Item	Parâmetros	Unidades	CC	CA-01	CB	CA-02	CA-03	CA-04
1	Tempo op. motogerador a plena carga	[Horas/dia]	-	3	8	10	12	13
1.1	Geração anual eletricidade motogerador	[MWh/ano]	-	826,0	2.202,7	2.753,4	3.304,1	3.579,4
2	Consumo total energia elétrica	[MWh/ano]	4.508,4	3.703,2	3.748,7	3.766,8	3.785,0	3.794,0
3	Potência do sistema fotovoltaico (SFCR)	[kWp]	-	1.040,0	1.040,0	650,0	260,0	-
3.1	Geração anual energia elétrica - SFCR	[MWh/ano]	-	1.437,0	1.437,0	900,0	363,0	-
4	Investimento inicial - projeto e instalação	[R\$×1000]	-	9.911,3	9.911,3	8.334,6	7.149,4	6.349,0
5	Manutenção e água de resfriamento	[R\$×1000]	103,7	197,2	266,7	288,3	309,9	324,5
6	Consumo de energia elétrica da rede	[MWh/ano]	4.508,4	1.440,2	109,0	113,4	117,9	214,6
7	Tarifa média da energia elétrica da rede	[R\$/kWh]	0,60	0,55	1,31	2,33	2,33	2,33
8	Consumo total de gás natural	[Nm³/ano]	78.000	455.412	715.452	826.603	941.519	1.001.493
9	Tarifa média do gás natural	[R\$/Nm³]	2,84	2,13	2,05	2,04	2,02	1,99
10	Taxa de desconto utilizada	[%] ao ano	10%	10%	10%	10%	10%	10%
11	Inflação estimada para o período	[%] ao ano	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%
12	Período de análise	[Anos]	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Resultados Econômicos								
13	TIR (taxa interna de retorno)	[%]	-	14,6%	15,8%	12,7%	9,9%	7,5%
14	VPL (valor presente líquido)	[R\$×1000]	-	3.424,6	4.428,6	1.748,0	-79,7	-1.099,7
15	PBS (payback simples)	[Anos]	-	7,0	6,6	8,6	8,8	9,9

Fonte: elaborada pelo autor

O estudo foi baseado em cinco alternativas, sendo quatro híbridas (CA-01, CB, CA-02 e CA-03) e uma trigerção pura (CA-04). As híbridas, integram uma trigerção a gás natural e um sistema fotovoltaico, enquanto a pura, apenas a trigerção a gás.

A Tabela 6, mostra a utilização de capital próprio, custos com manutenção e tratamento de água, consumo e tarifa média de energia elétrica conforme simulação na página da distribuidora CPFL (2020), consumo e tarifa do gás natural conforme deliberação ARSESP (2020) e índices financeiros adotados, além dos resultados econômicos dos cenários. Os cálculos e análises de viabilidade dos cenários se basearam nos conceitos de Parente, 2017.

Figura 7: VPL x Geração Fotovoltaica X Geração em Motogerador



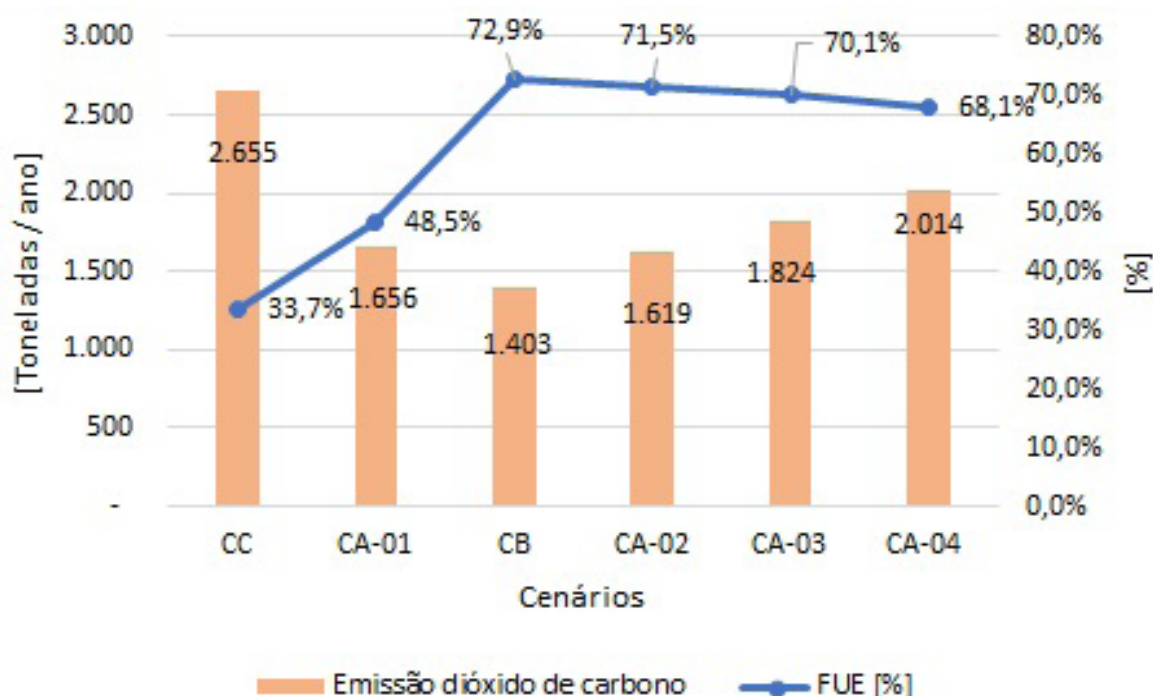
Fonte: Elaborada pelo autor

Para as condições do estudo, produzir energia elétrica, água gelada e água quente em usina híbrida apresentam índices econômicos aceitáveis quando comparado com a utilização da energia da rede. A Figura 7, mostra que o CB (cenário básico) apresenta o melhor VPL aparente, com o motogerador operando 8 horas e o sistema fotovoltaico na potência máxima, bem como evidencia que aumentar a geração de energia elétrica no motogerador a gás natural e reduzir em painéis fotovoltaicos, tende a menores valores de VPL.

### 3.3 Emissão de Dióxido de Carbono

A análise compara a emissão de dióxido de carbono dos cenários e relaciona com os resultados do FUE (fator de utilização de energia). Para efeito de cálculo, foi considerado que a energia importada da rede de distribuição é gerada em usinas termelétricas, as quais são despachadas para suprir a demanda não atendida pelas hidráulicas, eólicas, solares, biomassa, dentre outras. Sendo assumido que toda energia elétrica produzida localmente reduzirá o despacho das térmicas na mesma proporção.

Figura 8: Emissão de Dióxido de Carbono



Fonte: elaborada pelo autor

Os resultados da **Figura 8** indicam redução de 47,2 % na emissão de dióxido de carbono do cenário básico (CB) em comparação o atual (CC). A melhor condição aparente no CB, tanto em termos de emissão de dióxido de carbono quanto de FUE, ocorrem com baixo consumo de eletricidade da rede, com o motogerador operando 8 horas por dia e geração fotovoltaica na potência instalada máxima. Os cálculos mostram também a trigeração pura (CA-04) emitindo 43,5 % mais dióxido de carbono em comparação com o CB, em uma condição de baixo consumo de energia da rede, motogerador operando 13 horas por dia e sem geração fotovoltaica.

## 4 Conclusões

Com base nos resultados e análises, é possível concluir que:

- i. Os resultados de eficiência energética e emissão de dióxido de carbono se mostraram viáveis para todos os cenários estudados. No entanto, a viabilidade econômica indicou perda de atratividade com o aumento do consumo de gás natural, revelando forte influência do custo com gás natural;

- ii. O modelo híbrido do cenário básico, se mostrou viável técnica e financeiramente, configurado com o motogerador a gás natural operando 8 horas por dia a plena carga e sistema fotovoltaico conectado à rede na potência compatível com a demanda contratada. Os resultados mostraram FUE (fator de utilização de energia) de 72,9%, VPL (valor presente líquido) de R\$ 4.428.600,00, TIR (taxa interna de retorno) de 15,8 %, PBS (payback simples) de 6,6 anos, além da redução de 38,3 % do custo operacional e 47,2 % na emissão de dióxido de carbono;
- iii. Como demonstrado no balanço energético, o FUE de 72,9% da planta híbrida do cenário básico reflete o pequeno consumo de eletricidade da rede devido a contribuição dos painéis fotovoltaicos, bem como a elevada utilização de água quente cogenerada em resfriador de absorção para atender a demanda de água gelada do HVAC (do inglês, heating ventilating and air conditioning).
- iv. Através da interpolação dos resultados apresentados no balanço econômico geral, observa-se que o VPL (valor presente líquido) se torna negativo com a geração de energia elétrica em painéis fotovoltaicos abaixo de 11,6 % do consumo total da fábrica;
- v. Armazenar o calor excedente na forma de água quente de baixa temperatura para fins sanitários, resultou em ganhos de eficiência da ordem de 1,7% e redução do consumo de energia elétrica atual em mais de 2%;
- vi. A redução do tempo em carga do motogerador, mesmo sendo necessário consumir gás para produzir energia térmica em resfriador por absorção e caldeira, foi fator fundamental para a viabilidade econômica da solução proposta.
- vii. Prever na planta resfriador por absorção do tipo queima direta para produção de água gelada e caldeira para geração de calor, em condições de partida rápida pode incrementar a confiabilidade e flexibilização do sistema;
- viii. A utilização de fonte solar reduz substancialmente a emissão de dióxido de carbono da usina híbrida, por outro lado, a geração firme de energia do motogerador a gás natural resolve o problema de imprevisibilidade típica das renováveis;
- ix. Por fim, integrar as tecnologias de trigeração a gás natural com um sistema fotovoltaico conectado à rede, indicou ser uma alternativa promissora. A implantação da proposta conforme cenário básico poderá reduzir em 97,1% o consumo de energia da rede, sendo 58,8% produzido em motogerador a gás e 38,3 % em painéis fotovoltaicos. Além do aproveitamento dos rejeitos térmicos do sistema de resfriamento e exaustão do motogerador, o qual reduzirá em 16,3% o consumo de eletricidade, por meio da substituição dos resfriadores elétricos por absorção, juntamente com a redução de mais de 30% do consumo de gás natural na caldeira para produção de água quente e redução de 100% da energia elétrica utilizada para aquecimento de água para uso sanitário.

## 5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 3**. Brasília: ANEEL, 2017. 74 p. Disponível em: <PRODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição – ANEEL>. Acesso em: 02 de março de 2020.

AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DELIBERAÇÃO ARSESP Nº 995, de 27 de maio de 2020**. São Paulo: ARSESP, 2020. 18 p. <ldl9952020.pdf (arsesp.sp.gov.br)>. Acesso em: 15 de outubro de 2020.

BROAD. **Absorption Chiller**. New Jersey. USA. BROAD, 2020. <ABSORPTION CHILLER – BROAD U.S.A. INC. (broadusa.com)> Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO DE SALVO BRITO. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014)**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. Disponível em: <CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (cepel.br)>. Acesso em: 20 de janeiro de 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA DE ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO DE SALVO BRITO. **Potencial Energético Nacional**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2020. <CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (cepel.br)>. Acesso em: 10 de outubro de 2020

COMPANHIA PIRATININGA DE FORÇA E LUZ. **Distribuidora de Energia Elétrica do Estado de São Paulo**. Campinas: CPFL, 2020. <<https://www.cpfl.com.br/>>. Acesso em: 25 fev.2020.

DWSIM. **The Open-Source Chemical Process Simulator – Version 7.1.1**. DWSIM, 2021. <DWSIM - Open Source Process Simulator - Browse /DWSIM/DWSIM 7.1/7.1.2 at SourceForge.net>. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 219: Ano base 218**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <BEN 2019 Completo.indb (epe.gov.br)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021a. Disponível em: < BEN2021.pdf (epe.gov.br) > Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica – Cenário econômico próximos 10 anos**. Rio de Janeiro: EPE, 2021b. Disponível em: <Cenários econômicos para os próximos 10 anos (epe.gov.br)>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do plano decenal de expansão de energia 2031 – Demanda de eletricidade**. Rio de Janeiro: EPE, 2021c. Disponível em: <Apresentação do PowerPoint (epe.gov.br)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do plano decenal de expansão de energia 2031 – Previsão da produção de petróleo e gás natural.** Rio de Janeiro: EPE, 2021d. Disponível em: <Apresentação do PowerPoint (epe.gov.br)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

GENERAL ELECTRIC COMPANY. **Energy – Cogeneration Application Considerations.** GE, 2009. 48p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2019.** IEA, 2019. Disponível em: <WORLD ENERGY OUTLOOK 2019 (windows.net)> Acesso em: 05 de março de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2020 – The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions.** IEA, 2020. Disponível em <Global Energy Review 2020 (windows.net)>. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.

INNIO. **Jenbacher gas engine type 3 technical data.** Disponível em: <Sales and Services Provider | Company - INNIO>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Novo patamar para a bandeira tarifária de escassez hídrica.** Brasília. MME, 2021. <MME e Aneel apresentam medidas para enfrentamento do cenário de aumento nos custos de geração de energia – Português (Brasil) (www.gov.br)>. Acesso em: 10 dezembro de 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano de Operação Energética 2021/2025.** Rio de Janeiro: ONS, 2021. <<http://www.ons.org.br>> Acesso em: 20 de janeiro de 2022.

PARENTE, V. **Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Energia.** In: SIMÕES-MOREIRA, J.R. (org.). Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. São Paulo: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017. p. 336 – 348.

ROCHA, M.S.; Andreos, R.; SIMÕES-MOREIRA, J.R. **Performance tests of two small trigeneration pilot plants.** São Paulo: Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2012. 8 p.

SOLergo. **Projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados.** San Martino di Lupari. SOLergo, 2022. <Solergo - Progettazione impianti fotovoltaici in rete o in isola (electrographics.it)>. Acesso em: 20 de dezembro de 2021.

THERMAX. **Hot Water Vapour Absorption Chiller.** Mumbai. 2020. Thermax, 2020. <<https://www.thermaxglobal.com/>> Acesso em: 24 de fevereiro de 2020.

ZILLES, R. **et al.** Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012. 208 p.

10.34033/2526-5830-v6n19-3



## Artigo técnico

# Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de $^{29}\text{Si}$ no estado sólido

*Characterization of Portland Cement Phases Using X-Ray Diffraction and  $^{29}\text{Si}$  Solid State Nuclear Magnetic Resonance Techniques*

<sup>a</sup> Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Laboratório de Estruturas Leves, Núcleo de Estrutura Leves, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>c</sup> Laboratório de Microrreologia e Fisiologia Molecular, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.

<sup>d</sup> Laboratório de Análises Químicas, Centro de Química e Manufaturados, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>e</sup> Laboratório de Materiais de Construção Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: martha@ipt.br

Palavras-chave:  
cimento Portland; refinamento Rietveld;  $^{29}\text{Si}$ -NMR.

Keywords:  
Portland cement; Rietveld refinement;  $^{29}\text{Si}$ -NMR.

Thiago Ricardo Santos Nobre<sup>a</sup>, Martha González Pérez<sup>b\*</sup>, Antônio Carlos Bloise Jr<sup>c</sup>, Sérgio Cirelli Angulo<sup>a</sup>, Shoko Ota<sup>d</sup>, Valdecir Angelo Quarcioni<sup>e</sup>

## Resumo

Este artigo apresenta dados experimentais da caracterização mineralógica, de um cimento Portland CPV comercial empregando-se as técnicas de difratometria de raios X (DRX) associada ao refinamento de Rietveld e a espectroscopia de ressonância magnética nuclear do núcleo de  $^{29}\text{Si}$  ( $^{29}\text{Si}$ -RMN) em alta resolução no estado sólido, em amostra com 2,62 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . O cimento anidro apresenta 66 % de fases de silicatos de cálcio, 9 % de aluminatos de cálcio, 10 % de calcita, 9% de sulfatos de cálcio e 6 % de fases minoritárias. Nas pastas hidratadas verificou-se que 39,5 % são fases cristalinas e 60,5 % constitui-se de fases amorfas referentes ao gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é produto principal da hidratação do cimento Portland. Os dados dos silicatos anidros por espectroscopia  $^{29}\text{Si}$ -RMN foram determinados por sinais de deslocamento químico entre -75 ppm e -77 ppm, associados aos polimorfos da alita, enquanto que, em -71,3 ppm refere-se à belita. Aos 63 dias de hidratação o C-S-H foi observado no deslocamento químico entre -80 ppm e -85 ppm correspondentes aos sítios  $Q_1$  e  $Q_2$ , respectivamente. Os dados de espectroscopia  $^{29}\text{Si}$ -RMN permitiram detalhar a fase amorfa

gerada na hidratação do cimento, comprovando-se que se trata de C-S-H, fornecendo, portanto, informações estruturais antes e após a hidratação do cimento e evidenciam o potencial dessa técnica para aplicação em estudos de materiais cimentícios que, por exemplo, envolvem adição de materiais cimentícios suplementares, cujo monitoramento da evolução da hidratação poderá fornecer informações para o entendimento do grau de reatividade desses cimentos.

## Abstract

*This article presents experimental data on the mineralogical characterization of commercial PC V Portland cement, using X-ray diffractometry (XRD) techniques associated with Rietveld refinement and high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy of  $^{29}\text{Si}$  nucleus ( $^{29}\text{Si}$ -NMR) in solid state, in a sample containing 2.62 % of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . The anhydrous cement has 66% of calcium silicate phases, 9 % of calcium aluminates, 10% of calcite, 9 % of calcium sulfates, and 6 % of minor phases. In hydrated pastes, it was found that 39.5 % are crystalline phases and 60.5 % are amorphous phases referring to calcium silicate hydrate gels (C-S-H), which is the main product of Portland cement hydration. The data for anhydrous silicates by  $^{29}\text{Si}$ -NMR spectroscopy were determined by signs of chemical displacement between -75 ppm and -77 ppm, associated with alite polymorphs, while at -71.3 ppm they refer to belite. At 63 days of hydration, C-S-H was observed in the chemical displacement between -80 ppm and -85 ppm corresponding to Q1 and Q2 sites, respectively. The  $^{29}\text{Si}$ -NMR spectroscopy data allowed to detail the amorphous phase generated in the hydration of the cement, being proven that it is C-S-H, which therefore provides structural information before and after the hydration of the cement, and evidences the potential of this technique for application in studies of cementitious materials that, for example, involve the addition of supplementary cementitious materials, whose monitoring of hydration evolution may provide information to understand the degree of reactivity of these cements.*

## 1 Introdução

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas permitiu um avanço muito expressivo no campo dos equipamentos para laboratório, com enorme ganho em termos de precisão de resultados de ensaios, produtividade, redução no consumo de reagentes químicos e decorrente ganho na questão ambiental, ao minimizar o uso de determinados reagentes químicos e implementação de automação no controle de qualidade de produção na indústria. Em muitos campos, a Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) ocorreu muito graças ao acesso a técnicas analíticas inovadoras.

A química de cimento apresentou um salto significativo em termos do conhecimento, especialmente a partir da segunda metade do século XX com o advento de equipamentos de última geração e potentes recursos de informática. Os Anais dos Congressos Internacionais

de Química do Cimento publicados com certa periodicidade desde 1918 constituem um valioso documentário da evolução do conhecimento gerado. Na palestra magna do IX Congresso Internacional de Química do Cimento, realizado na Índia em 1992, foram abordados os avanços no conhecimento da hidratação do cimento em temperaturas baixas, ambientais e elevadas. Naquela ocasião também foi citada, pela primeira vez, a aplicação da técnica de espectroscopia de ressonância magnética nuclear em estudos de cimento Portland (SCRIVENER; WIEKER, 1992).

Passados quase 30 anos das pesquisas pioneiras aplicando-se RMN em cimento, dispomos atualmente de espectrômetros com diversas melhorias consolidadas que permitem avançar e abrir novos campos de investigação. O IPT adquiriu um espectrômetro de RMN para amostras em estado sólido em 2010 com a perspectiva de desenvolver a aplicação da técnica na caracterização de materiais diversos como suporte ao atendimento às demandas da indústria nacional e especialmente P&D. Este artigo traz resultados da aplicação desta técnica em cimento Portland realizados no IPT, que contou com duas parcerias estabelecidas neste período, com o Instituto *Fraunhofer* na Alemanha e com o Instituto de Física da USP. Para introduzir o leitor a este tema serão abordados, na sequência, alguns conceitos de química de cimento e sua relação com a técnica de RMN, de forma a favorecer o entendimento dos dados da literatura e dos resultados dos ensaios apresentados e, ao mesmo tempo, contribuir na prospecção de novas aplicações que envolvem materiais no estado sólido.

## 2 Química de cimento e a aplicação das técnicas de RMN no estado sólido e de DRX com refinamento de Rietveld

O cimento Portland fabricado no mundo todo é majoritariamente destinado à produção de concreto para as obras civis de infraestrutura e habitação. A produção do concreto mundial, necessário para a indústria de construção civil, ultrapassa 10 bilhões de toneladas por ano. No ano de 2019, a quantidade de cimento produzido no mundo foi de 4,10 bilhões de toneladas (STATISTA, 2019) e a produção estimada de concreto pode ter sido próxima de 25 bilhões de toneladas. O cimento Portland utilizado para fabricação do concreto é um material complexo, composto de diversas fases minerais formadas principalmente por cálcio, silício, alumínio e ferro.

A reação química do cimento com a água gera diversas fases cristalinas e, também, amorfas. A identificação das diferentes estruturas amorfas ocorridas durante a evolução da hidratação do cimento é crucial para o entendimento das características físico-químicas, mecânicas e de durabilidade das estruturas de concreto. Sabe-se que os silicatos de cálcio são considerados os principais responsáveis pela elevada coesão da pasta de cimento hidratada e são, também, as fases mais importantes pelas propriedades da pasta de cimento endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Diversas técnicas são utilizadas para caracterizar química e mineralogicamente o cimento, tais como, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, fluorescência de raios X, difratometria de raios X (DRX) e, mais recentemente, a espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN).

A DRX é uma técnica tradicionalmente utilizada para caracterização qualitativa e quantitativa de fases cristalinas. É possível também quantificar o teor de fases amorfas (GOBBO, 2009), mesmo que a identificação das fases amorfas tenha limitações intrínsecas. Em 1969 foi introduzido o método de tratamento dos dados de DRX, por refinamento de Rietveld, que se utiliza de modernos recursos de software e permite quantificar o teor de fase amorfa no material com maior precisão.

Uma sofisticada técnica para investigar e caracterizar igualmente as fases cristalinas e as fases amorfas do cimento anidro e hidratado é a espectroscopia de RMN de  $^{29}\text{Si}$  no estado sólido. A maioria dos estudos de RMN em cimento, tem utilizado cimento branco, que possui baixíssimo teor de óxido de ferro (<1 %) (SKIBSTED, 2016), no entanto, o cimento Portland contém comumente de 2 % a 5 % de  $\text{F}_2\text{O}_3$  em sua composição, podendo interferir na resolução do espectro de RMN. Porém, há poucos estudos realizados com cimentos cinza que têm mais ferro na sua composição em comparação com os cimentos brancos. A presença de íons paramagnéticos, entre eles o  $\text{Fe}^{+3}$ , contribui nos processos de relaxação do sinal de RMN de  $^{29}\text{Si}$ , o que diminui assim a intensidade do sinal registrado e sua possibilidade de ser analisado (MULLER, MITCHELL, McDONALD, 2016).

A aplicação e a importância desta técnica em amostras de cimento com diferentes tempos de hidratação são inestimáveis na resolução dos mecanismos de reação, cinética e evolução microestrutural, os quais estão diretamente correlacionados às propriedades e desempenho de concretos e argamassas, que contêm cimento hidratado como material ligante (WALKLEY; PROVIS, 2019). As espectroscopias  $^{27}\text{Al}$  e  $^{29}\text{Si}$  RMN são técnicas úteis para analisar a coordenação atômica e a polimerização polimérica em materiais cristalinos e amorfos (PENA et al., 2008). Em ambos os casos, a partir da análise dos espectros de RMN, pode-se deduzir informações sobre coordenação de átomos, polimerização de poliedros e a vizinhança de determinados núcleos atômicos.

### 3 Cimento Portland: um ligante mineral

Os dois maiores constituintes do cimento Portland são o  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e o  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ), enquanto os produtos primários de hidratação dessas fases são: o hidróxido de cálcio, também denominado portlandita, e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sendo a fase C-S-H responsável pela resistência mecânica do cimento endurecido e seus compósitos cimentícios, como concreto e argamassa. A matriz cimentícia é composta ainda por outros produtos de hidratação como a etringita (AFt) e o monossulfoalumínio de cálcio (AFm), e água retida nos poros de vários tamanhos, e em diferentes formas de fixação, como água livre, água capilar e quimicamente combinada. A depender da idade de hidratação é possível encontrar partículas de cimento anidro dispersas na matriz (TAYLOR, 1997).

## 4 O potencial da técnica de RMN na caracterização do silicato de cálcio hidratado (C-S-H)

O C-S-H corresponde 50 % a 60 % do volume de sólidos nas pastas de cimento completamente hidratadas, sendo assim, é o constituinte majoritário e a fase mais importante e determinante das suas propriedades (TAYLOR, 1997). O C-S-H é o principal responsável pelas propriedades microestruturais, resistência mecânica e durabilidade do concreto de cimento Portland, originado a partir da pasta de cimento Portland comum totalmente hidratada (NEVILLE, 1997).

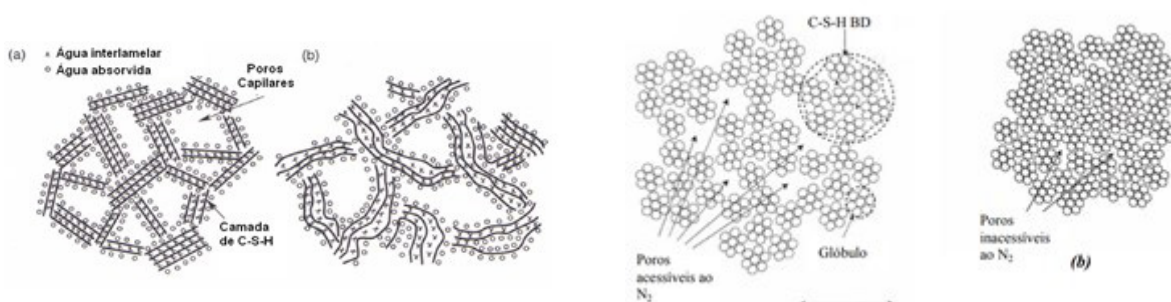
Há quase dois séculos da invenção do cimento Portland, a estrutura do C-S-H não é conhecida com precisão, mas há concordância no meio científico de que se trata de uma estrutura atômica formada por camadas com cadeias de  $\text{SiO}_4$ , com algumas substituições de Si por Al. Vários modelos têm sido propostos para explicar as propriedades dos materiais cimentícios. O modelo proposto por Powers e Brunauer, há mais de seis décadas, descreve que o material tem uma estrutura em camadas, com elevada área superficial, sendo as distâncias sólidos-sólidos denominadas espaços interlamelares (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A estrutura do C-S-H pode variar desde redes pouco cristalinas até redes reticulares (RICHARDSON, 2008).

Na hidratação do cimento Portland, há consenso de que existem pelo menos dois tipos diferentes de C-S-H, que se formam por mecanismos diferentes, apresentando densidades diferentes e, também, estruturas distintas. Esses dois tipos de C-S-H, de alta (HD) e baixa (LD) densidade (TENNIS; JENNINGS, 2000) podem contribuir de diferentes formas para as propriedades dos materiais à base de cimento.

Powers e Brunauer consideram o C-S-H estruturado por partículas individuais formadas por duas ou três camadas simples (YOUNG, 1988). De acordo com Feldman-Sereda (1970), o C-S-H possui um arranjo irregular ou "dobrado" em camadas, criando espaços interlamelares de diferentes formas e tamanhos. Já o modelo de Munich, apresentado por Wittmann (1982), propõe a estrutura em forma de uma rede tridimensional de gel amorfo formado por compostos chamados de xerogel. E por fim, o modelo desenvolvido por Jennings propõe que o C-S-H é uma agregação de precipitados coloidais os quais são modificados durante a hidratação. A Figura 1 ilustra os quatro modelos propostos.

Figura 1 – Modelos do C-S-H: (a) Powers; (b) Feldman-Sereda; (c) Munich; (d) Jennings



Fonte: adaptado pelos autores de Young (1988) e Wittmann (1982).

Sabe-se que o C-S-H é o principal produto da hidratação do cimento Portland, que apresenta baixa cristalinidade e composição química variável, assim esta fase pode ser quantificada por difração de raios X com refinamento de Rietveld, identificada pelo teor de amorfos do cimento hidratado.

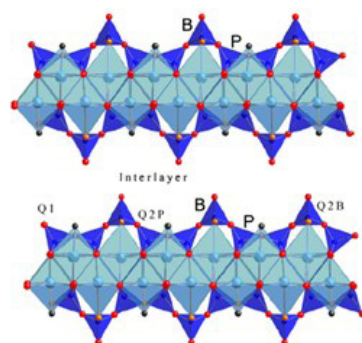
As estruturas de silicato de acordo com Mackenzie e Smith (2002), podem ser representadas como cadeias de silicatos de comprimentos variados em coordenações tetraédricas com diversos graus de polimerização, formados por uma camada interlamelar contendo moléculas de H<sub>2</sub>O confinadas e podem ser denominadas com a notação "Q", que significa um átomo de silício e 4 de oxigênio ligados a ele. A adição de um número sobrescrito à notação, variando de 0 a 4, corresponde a um grau específico de polimerização. A notação Q<sup>4</sup>, por exemplo, representa 1 silício ligado a 4 oxigênios e cada um destes ligado a 1 silício, que contém outros 3 oxigênios.

Quando ocorre a hidratação dos silicatos de cálcio, a polimerização da sílica altera a conformação do silicato e isso pode ser observado nos espectros de RMN já que cada tipo de coordenação (denominação Q) aparece num determinado deslocamento químico, podendo variar durante o tempo de indução inicial, uma vez que a polimerização vai aumentando com o tempo de hidratação (MACKENZIE e SMITH, 2002). A estrutura Q<sup>0</sup> em cimento representa o silicato anidro (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S) e as estruturas Q<sup>1</sup> e Q<sup>2</sup> correspondem aos silicatos hidratados (C-S-H) formados por ânions (dímeros) após a polimerização.

Os espectros de RMN mostram que inicialmente são formados os monômeros dos silicatos de cálcio hidratado e posteriormente, durante o período de aceleração, ainda nas primeiras horas de hidratação, são formados os dímeros. O C-S-H pode apresentar (em termos gerais) cadeias Q<sup>2</sup> de Si com comprimentos variados e Q<sup>1</sup> de Si nos pontos de terminação da cadeia (Figura 2), como ilustrado por Lothenbach e Nonat (2015).

A composição química e a morfologia do C-S-H apresentam semelhanças significativas com o mineral natural tobermorita; por esta razão na literatura, até poucos anos se denominava tobermorita o gel de C-S-H encontrado no cimento hidratado.

Figura 2 – Diagrama esquemático da estrutura da tobermorita.



Fonte: Lothenbach e A. Nonat (2015), onde as esferas vermelhas representam o oxigênio ligado ao silício ou ao cálcio, as esferas azuis o cálcio e as pretas um átomo de oxigênio ligado apenas ao cálcio. B = ponte e P = emparelhamento.

O diagrama esquemático na **Figura 2** representa a estrutura da tobermorita, mostrando as cadeias de sílica, sendo: Q<sup>1</sup> as extremidades das cadeias (1 vizinho) e Q<sup>2</sup> a cadeia intermediária (2 vizinhos). A camada interlamelar é composta por íons cálcio (álcalis ou outros), moléculas de água confinadas e água interlamelar. O cálcio localizado na camada interlamelar possibilita a formação de pontes em Q<sup>1</sup> de compostos de silicatos. As cadeias de silicato são dispostas em uma estrutura conhecida por "dreierkette", com base em uma unidade de cadeia de repetição de três tetraedros, sendo: dois 'emparelhamento' denotados por P e uma 'ponte' denominada B.

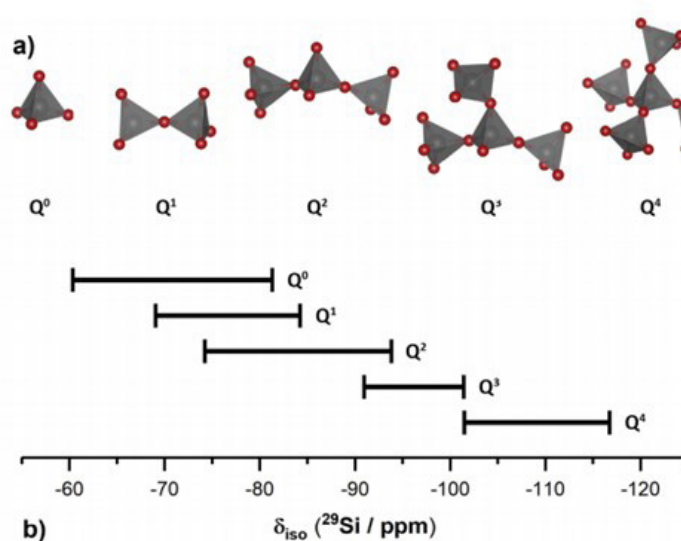
Os espectros de RMN no estado sólido podem apresentar uma forma de linha complexa devido às interações do dipolo nuclear magnético e características das amostras, como tempo de relaxação, deslocamento químico e efeitos quadripolares.

Os resultados de ensaios de <sup>29</sup>Si-RMN, utilizando a técnica de Rotação em torno do Ângulo Mágico no estado sólido, para materiais contendo sílica, mostram uma gama de informações estruturais, que não podem ser obtidas por meio de outras técnicas (MASON, 1987; HARRIS e MANN, 1978) como, por exemplo, pela difratometria de raios X.

O deslocamento químico de <sup>29</sup>Si na unidade de Si-O, presente nos materiais à base de sílica ou silicatos, é sensível ao número de coordenação com os átomos de oxigênio, podendo variar entre -60 e -120 ppm. O tetrametilsilano (TMS), de fórmula Si(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub> é utilizado como padrão de referência de deslocamento químico, cujo sinal define a posição 0 ppm para o silício nos espectros.

As estruturas de silicatos são formadas por unidades tetraédricas com diversos graus de polimerização (KLEIN, 2012) como ilustra a **Figura 3**:

**Figura 3** - Intervalos típicos de deslocamentos químicos <sup>29</sup>Si para Q<sup>n</sup>



Fonte: Engelhardt, Michel (1987) *apud* Walkley, Provis (2019)

Com a abordagem da literatura apresentada, a partir da natureza do cimento Portland e estudos que envolvem a sua caracterização empregando-se RMN e DRX, verifica-se que essas duas técnicas, são importantes, pois apresentam significativo potencial para estudos de monitoração da evolução da hidratação do cimento, mesmo com suas limitações próprias.

A técnica de RMN possui potencial relevante na caracterização do C-S-H quanto à seletividade e precisão, e consiste num diferencial importante, pois esta fase aumenta progressivamente com o tempo de hidratação, estando diretamente relacionada ao ganho de resistência mecânica de pastas cimentícias, argamassas e concretos. No entanto, a presença do ferro, que de acordo com acervo do IPT, é tipicamente encontrado no cimento Portland numa faixa de 2 % a 5 % em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , representa uma limitação para aplicação desta técnica analítica.

Neste contexto, este artigo tem por objetivo apresentar dados experimentais da caracterização de uma amostra de cimento Portland empregando-se espectroscopia de ressonância magnética nuclear do núcleo de  $^{29}\text{Si}$ , de alta resolução no estado sólido, para ilustrar o potencial da técnica, levando em consideração a limitação imposta pela presença de 2,62 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . As etapas de preparação e análise da amostra serão detalhadas na sequência, de forma a apresentar ao meio técnico-científico esta ferramenta laboratorial para atender demandas de P&D em cimento Portland, recentemente disponível no Instituto. A mineralogia da amostra anidra e hidratada também foi caracterizada por difratometria de raios X com refinamento de Rietveld.

## 5 Procedimento experimental

### 5.1 Material

Foram utilizados cimento anidro CP V ARI (CP V ARI-An), água deionizada e aditivo dispersante/plastificante, à base de policarboxilato.

### 5.2 Métodos empregados na caracterização físico-química

#### 5.2.1 Espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)

Os constituintes principais do cimento anidro foram quantificados por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). A amostra foi fundida na proporção amostra:fundente 1:6,75, em massa, em cadinho de platina, empregando-se máquina de fusão na temperatura da ordem de 1200 °C. As pastilhas fundidas foram analisadas no equipamento Minipal da marca Panalytical e os teores obtidos de uma curva analítica para cimento Portland, estabelecida e previamente calibrada pelo Laboratório de Materiais para Produtos de Construção do IPT.

### 5.2.2 Perda ao fogo

A determinação da perda ao fogo foi realizada conforme a norma ABNT NBR NM 18 (2012a), calcinando-se uma alíquota de 2,5 g de amostra, acondicionada em cadinho de porcelana, empregando-se forno mufla à  $950 \pm 50$  °C, por um período mínimo de 50 min. Após este período, o material resfriado em dessecador foi devidamente pesado.

### 5.2.3 Cal livre

O teor de cal livre do cimento anidro foi determinado por via úmida, segundo a norma ABNT NBR NM 13 (2012b), e consiste em solubilizar o hidróxido de cálcio presente em uma alíquota de cerca de 1 g de amostra em solução de etileno glicol, o que confere um caráter básico ao meio. Na sequência, por titulação com ácido clorídrico diluído, determinou-se a alcalinidade do meio que é proporcional à cal livre presente no cimento anidro.

### 5.2.4 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica do cimento e da pasta hidratada pulverizada foi realizada em um granulômetro a laser Helos KR, Sympatec, com capacidade de análise de partículas com tamanho entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 350  $\mu\text{m}$ . Cerca de 200 mg do material foram dispersos em água por meio de um misturador IKA Labortechnik RW 20, com velocidade constante de 10.000 rpm, durante 1 minuto. Em seguida, a suspensão foi transferida para o granulômetro e imediatamente iniciada a coleta dos dados. Para cada material, foram analisadas três alíquotas e, para cada uma delas, executadas três medidas de 10 s precedidas pela redispersão do meio por ultrassom, durante 2 min.

### 5.2.5 Área específica por BET

A determinação da área específica por BET está fundamentada no fenômeno de adsorção física de gás nitrogênio na superfície sólida da amostra; empregou-se um equipamento Belsorp Max, Bel Japan. Foi realizado pré-tratamento de secagem das amostras em um equipamento BELPREP-vacII, Bel Japan, com pressão de  $10^{-2}$  kPa e temperatura de 40 °C, durante 16 horas. Foi utilizada massa de aproximadamente 1,5 g dos cimentos anidro e hidratado pulverizados. A temperatura e o tempo de pré-tratamento foram definidos de maneira a evitar a desidratação da gipsita. Todas as análises foram realizadas na faixa entre 0,05 p/p0 e 0,25 p/p0, sendo que p0 é a pressão de condensação do nitrogênio e p a pressão empregada pelo equipamento nos respectivos pontos de análise. Para realização das isotermas, o procedimento é o mesmo da obtenção da área específica, porém com pressão p/p0 de 0,05 a 0,99.

### 5.2.6 Densidade real

A densidade real ou absoluta foi determinada pelo Picnômetro de gás Hélio – Modelo Accupyc 1340 da Micromeritics. O ensaio consiste em medir a mudança de pressão que ocorre em duas condições de ensaios: sem a presença das partículas do sólido e com a presença das partículas do sólido na célula. A célula, com volume conhecido, é pressurizada até cerca de 19 psi. Em seguida, as partículas são adicionadas na célula e a pressão correspondente é determinada pela Lei universal dos gases e admitindo-se comportamento ideal do gás He. O volume real das partículas foi obtido pela diferença da pressão entre as duas câmaras previamente calibradas: a primeira, contendo a amostra, e a segunda de referência, vazia.

## 5.3 Caracterização das fases principais

### 5.3.1 Preparação da pasta hidratada de cimento (CP V ARI-Hd)

A mistura da pasta de cimento para caracterização dos produtos de hidratação foi processada em misturador, de alta rotação (10.000 rpm), de acordo com as etapas descritas abaixo:

- Pesagem dos materiais (cimento, água e aditivo), conforme dados apresentados na **Tabela 1**;
- Adição de todo cimento em um recipiente metálico;
- Adição de toda água sobre o cimento e mistura manual por 30 s, para favorecer a molhagem e homogeneização de todas as partículas de cimento. O aditivo foi misturado com a água, a fim de se obter uma solução homogênea;
- Mistura da pasta no misturador de alta rotação por 60 s.

Após a mistura, a pasta foi acondicionada em recipientes de plástico, onde permaneceu em cura saturada, por 63 dias, em temperatura de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Passado o período de cura, a pasta hidratada foi levada à estufa por 24 h à  $60\text{ °C}$  (para secagem – pois acredita-se que até esta temperatura não devem ocorrer mudanças microestruturais), moída em almofariz de porcelana, passada totalmente em peneira de malha  $75\text{ }\mu\text{m}$  e acondicionada em dessecador à vácuo e com sílica gel até a realização dos ensaios.

Tabela 1 – Parâmetros quantitativos relativos à preparação da pasta de cimento

Tipo de cimento	Teor de cimento (g)	Teor de água (g)	Teor ótimo de dispersante (g)	Relação a/c (g/g)	Relação a/c (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )*
CP VARI – A	100	38	0,35	0,38	1,16

Legenda: \*Volumes calculados a partir da densidade específica obtida por picnometria de Hélio.

Fonte: elaborado pelos autores.

### 5.3.2 Quantificação de fases por DRX

Para quantificação de fases foi utilizado difratômetro de raios X, marca Panalytical, modelo X'Pert PRO MPD. As condições de operação foram: radiação CuK $\alpha$  (45 kV/ 40mA), fenda divergente fixa, passo angular de 0,017° 2 $\theta$ . Tempo do passo 60 s e varredura de 8,0° a 60,0°.

A identificação das fases foi realizada com o auxílio do software *Panalytical X-Pert HighScore Plus* (versão 4.8), com base nos dados das fichas padrão fornecidas pelo COD (*Crystallography Open Database*), apresentadas na Tabela 2.

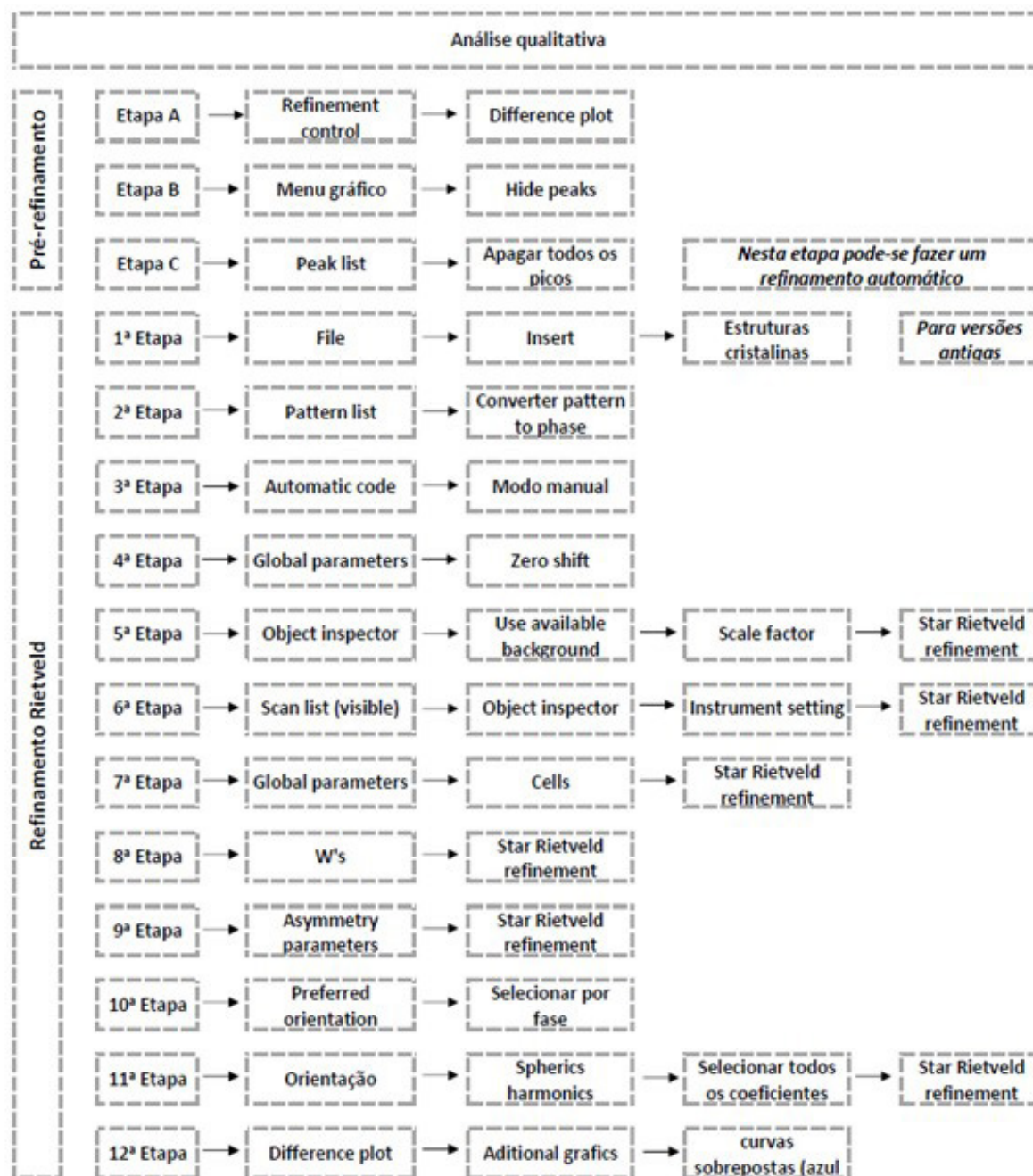
Tabela 2 – Referências das diferentes estruturas de fases utilizadas na análise de Rietveld.

Estrutura	Fórmula	Sistema cristalino	COD
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	hexagonal	96 900 0776
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	hexagonal	96 900 0967
Aluminato	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cúbico	96 100 0040
Alita	3CaO.SiO <sub>2</sub>	monoclínico	96 154 0705
Bassanita	CaSO <sub>4</sub> .0,5H <sub>2</sub> O	monoclínico	96 901 2209
Brownmillerita	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ortorrômbico	96 901 6629
Monocarboaluminato	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .CaCO <sub>3</sub> .11H <sub>2</sub> O	triclínico	96 100 0460
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	monoclínico	96 101 1075
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	hexagonal	96 900 0114
Larnita	2CaO.SiO <sub>2</sub>	monoclínico	96 901 2791
Etringita	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3CaSO <sub>4</sub> .32H <sub>2</sub> O	hexagonal	96 901 2923
Tobermorita	Ca <sub>5</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	-	96 900 5448

Fonte: elaborado pelos autores.

Para o refinamento das estruturas cristalinas foi feita a sequência de ajustes dos seguintes parâmetros: função de perfil pseudo-Voigt. O ajuste da radiação de fundo foi feito pelo polinômio *use available background*. Foram refinados o fator escala, cela unitária, radiação de fundo, assimetria do perfil, posição atômica e orientação preferencial. A Figura 4 apresenta o fluxograma esquemático de todas as etapas de refinamento das fases aplicadas pelo método de Rietveld.

Figura 4 - Fluxograma das etapas para Refinamento Rietveld



Fonte: elaborado pelos autores.

### 5.3.3 Espectroscopia de $^{29}\text{Si}$ -RMN no estado sólido

O espectrômetro de RMN é constituído por um ímã, geralmente do tipo supercondutor, que tem um campo magnético intenso e uniforme, e fontes de radiação eletromagnética de rádio frequência. Os espectros de RMN de  $^{29}\text{Si}$  foram obtidos num espectrômetro Varian (atual Agilent), modelo 400MR, com campo de 9,4 Tesla, na frequência de observação de 79,49 MHz. Foi aplicada a sequência de polarização direta e rotação em torno do ângulo mágico de 4400 Hz.

Uma vez que a abundância do  $^{29}\text{Si}$  é baixa (4,7 %), os espectros foram medidos durante 24 h para se atingir uma razão sinal/ruído adequada. Essas análises foram feitas no Laboratório de Química e Manufatura do IPT.

## 6 Resultados e discussão

### 6.1 Caracterização físico-química

Os resultados da análise química do cimento CP V ARI estão apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3 – Resultados da análise química do cimento CP V-ARI.**

Constituinte	CaO total	CaO livre	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	RI	PF
CP V-A	57,8	1,94	21,4	4,79	<b>2,62</b>	2,65	3,12	0,83	0,83	1,35	3,77

Fonte: elaborado pelos autores.

O cimento CP V-ARI conforme definido pela ABNT NBR 16697/2018 é constituído por 90 % a 100 % de clínquer e sulfatos de cálcio e 0 % a 10 % de material carbonático (filer). O CP V-ARI apresentou perda ao fogo de 3,77 %, abaixo do valor limite (6,50 %) recomendado pela citada norma técnica. De forma análoga, o CO<sub>2</sub> emitido pela descarbonatação de material carbonático foi de 1,83 %, também abaixo do limite de norma (5,5 %). O teor de o CO<sub>2</sub> obtido na análise química corresponde, por estequiometria, a 4,15 % de CaCO<sub>3</sub>, que é o constituinte majoritário do filer calcário. A perda ao fogo (PF) de 3,77 % do cimento anidro deve-se basicamente à volatilização da água de constituição da gipsita, da bassanita e do dióxido de carbono, oriundo do filer calcário. As diferentes características físicas e granulométricas do cimento anidro e da pasta hidratada são apresentadas na **Tabela 4**.

Tabela 4 – Dados de caracterização física e granulométrica do cimento e da pasta hidratada de cimento.

Grandezas	CP V ARI-An	CP V ARI Hd
Densidade específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,06	2,34
Área específica BET (m <sup>2</sup> /g)	1,53	10,07
D <sub>10</sub> (μm)	1,87	3,03
D <sub>50</sub> (μm)	14,00	22,60
D <sub>90</sub> (μm)	40,45	61,56

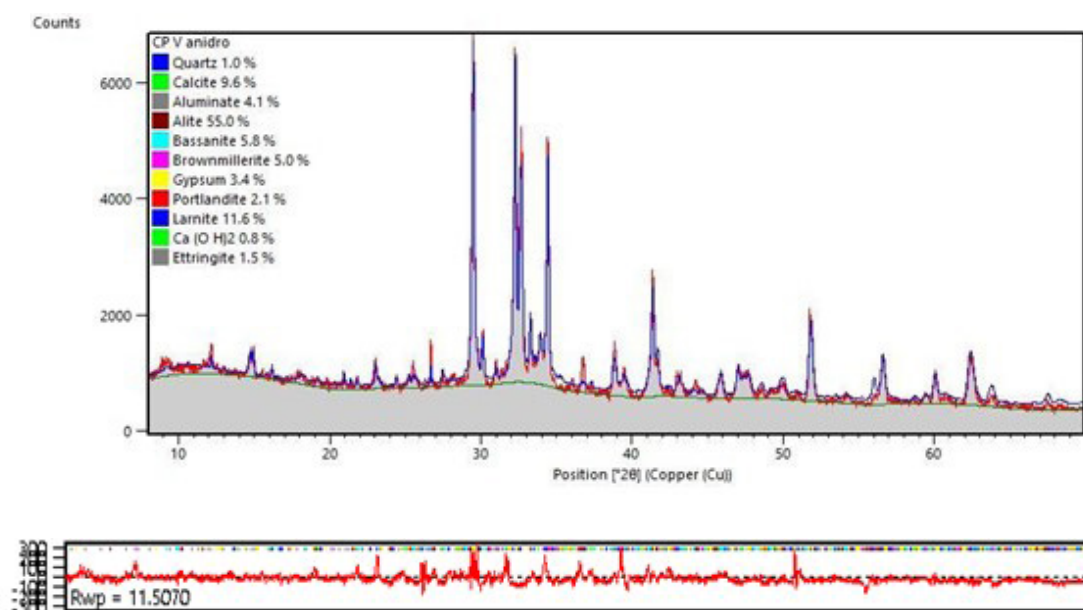
Fonte: elaborado pelos autores.

## 6.2 Caracterização das fases principais

### 6.2.1 Quantificação de fases do cimento anidro por DRX

A Figura 5 apresenta o difratograma do cimento anidro com o gráfico de refinamento pelo método Rietveld com os resultados quantitativos e indicadores estatísticos Gof e Rwp.

Figura 5 – Difratograma de raios X do cimento anidro: a) método de refinamento Rietveld, b) diferença entre os difratogramas observado e calculado (Gof 2,41 e Rwp 11,51).



Fonte: elaborado pelos autores.

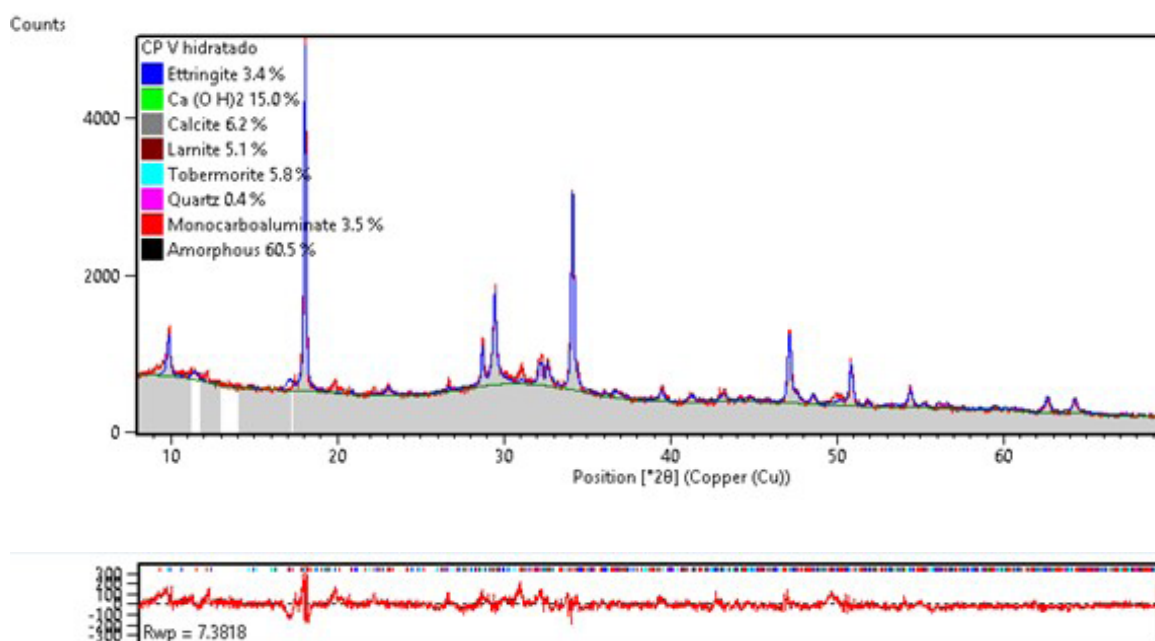
O cimento anidro apresentou 55 % de alita (M3), o composto majoritário do cimento Portland, seguido da larnita (beta- $C_2S$ ) com 11,6 %. O teor de calcita (material carbonático presente) foi de 9,6 %, isso vale para o cimento CP V ARI com incorporação permitida de até 10 % de material carbonático como adição mineral. Para a maioria dos cimentos nacionais compostos por mais de uma adição mineral, a quantificação das fases se torna mais complexa. As fases aluminato somaram 9,1 %, sendo 4,1 % de aluminato tricálcico e 5,0 % de brownmillerita. Foram obtidos os teores de 3,4 % de gipsita e 5,8 % de bassanita, o que pode sinalizar ocorrência de desidratação parcial da gipsita.

O teor de quartzo identificado foi 1 %. O quartzo é um mineral que pode estar presente como mineral acessório ou em impurezas no sulfato de cálcio, no calcário ou na argila empregados na produção do cimento. O cimento anidro apresentou uma pequena hidratação, dado o teor 2,9 % de portlandita presente, produto da reação de hidratação de silicatos de cálcio e também 1,5 % de etringita. Não se constatou a presença de amorfos porque se trata de hidratação incipiente, com baixo teor de C-S-H.

## 6.2.2 Quantificação de fases do cimento hidratado por DRX

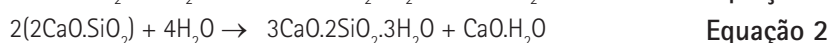
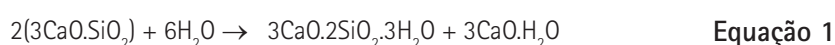
A Figura 6 apresenta o difratograma da pasta de cimento hidratada aos 63 dias de idade, e o gráfico de refinamento pelo método Rietveld, com os resultados quantitativos e indicadores estatísticos Gof e Rwp.

Figura 6 – Difratograma de raios X da pasta hidratada: a) método de refinamento Rietveld, b) diferença entre os difratogramas observado e calculado (Gof 1,67 e Rwp 7,38).



Fonte: elaborado pelos autores.

O cimento hidratado apresentou 39,5% de fases cristalinas, das quais 15,0 % foi de portlandita, 5,8 % tobermorita, 3,5 % monocarboaluminato e 3,4 % de etringita. A calcita foi consumida parcialmente dando origem ao monocarboaluminato de cálcio, permanecendo o remanescente de 6,2 % de calcita. O silicato residual foi de 5,1 % de larnita; sabe-se que esta fase continua a se hidratar por idades mais longas (~90 dias ou mais). Quanto à fase amorfa, o teor obtido foi 60,5 % e se refere basicamente ao gel C-S-H. Vale ressaltar que a sigla hifenizada do C-S-H indica as diferentes e variáveis relações molares entre estes elementos (cálcio, sílica e hidrogênio), conforme discutido, anteriormente, na introdução. Assim, após o contato do cimento com a água, podemos considerar que os dois compostos anidros hidratam-se completamente, e as fases formadas podem ser expressas pela Equação 1 e Equação 2:

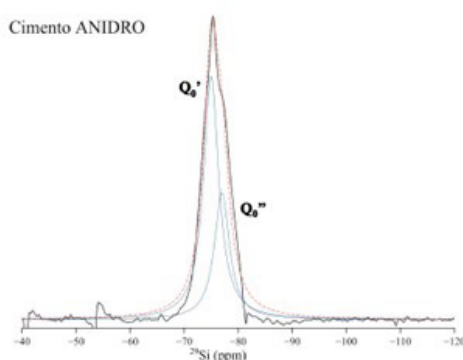


Os silicatos de cálcio hidratado são complexos e apresentam picos de baixa intensidade para detecção por DRX (tobermorita e jenita são as fases mais presentes), por apresentarem estruturas semi-cristalinas e amorfas, assim é possível a quantificação pelo teor de material amorfo total. O sistema de hidratação do cimento é dinâmico, com várias fases se dissolvendo, outras se formando ou se transformando, pois são metaestáveis, num conjunto de reações que ocorrem em sequência ou em paralelo, cuja compreensão do mecanismo do conjunto é complexa (TAYLOR, 1997). Para ampliar o entendimento da estrutura e o tipo de polimerização dos silicatos, que estão vinculados às propriedades dos materiais cimentícios, foi realizada a caracterização pela técnica de espectroscopia de  $^{29}\text{Si}$ -RMN no estado sólido.

### 6.2.3 Caracterização do cimento anidro por espectroscopia de $^{29}\text{Si}$ -RMN no estado sólido

O espectro de RMN de  $^{29}\text{Si}$  do cimento anidro do CP V ARI é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Espectro de RMN de  $^{29}\text{Si}$  do cimento anidro.



Espécies	Deslocamento químico (ppm)	Largura	Intensidade
Q <sub>0</sub> '	-75	1,70	1,5403
Q <sub>0</sub> ''	-77	1,70	0,8022

Fonte: elaborado pelos autores.

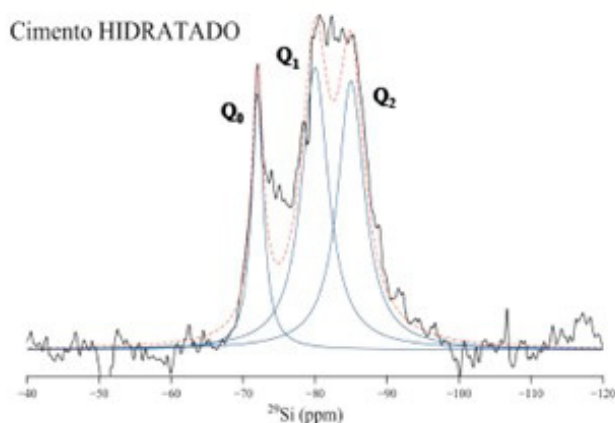
No espectro é observada uma banda larga resultante da sobreposição de sinais com deslocamento químico centrado entre -75 ppm e -77 ppm. Foi realizado o ajuste por meio de funções matemáticas do tipo lorentzianas da banda, de forma a separar os sinais originais, representados nas linhas em azul e, assim, identificá-los. O sinal com deslocamentos químicos entre -60 ppm e -80 ppm (Figura 3) pode ser associado às fases de silicatos anidros do cimento: -75 ppm referente à alita ( $Q_0'$ ), enquanto que o sinal em -77 ppm ( $Q_0''$ ) é atribuído à belita ( $\beta$ - $C_2S$ ). A quantificação relativa de alita e belita foi obtida a partir do cálculo da área dos sinais separados do espectro de  $^{29}Si$ -RMN, sendo a área equivalente às concentrações relativas das espécies  $Q_0'$  e  $Q_0''$ . O sinal associado à alita possui uma área maior, e correlacionando-se com o difratograma mostrado e discutido nas análises de DRX, confirma-se que o cimento Portland CP V ARI estudado é composto majoritariamente por alita.

A abordagem utilizada pressupõe que a composição do cimento anidro bem como da pasta hidratada é, constituída principalmente por alita e belita, e que todo o Si está presente nestas fases.

#### 6.2.4 Caracterização do cimento hidratado por espectroscopia de RMN $^{29}Si$ no estado sólido

O espectro de RMN de  $^{29}Si$  da pasta de cimento hidratado é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Espectro de  $^{29}Si$  RMN da pasta hidratada.



Espécies	Deslocamento químico (ppm)	Largura	Intensidade
$Q_0$	-72	1,00	0,6104
$Q_1$	-80	2,25	1,5129
$Q_2$	-85	2,25	1,4400

Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme discutido anteriormente, o C-S-H é o principal produto da hidratação do cimento Portland. Na Figura 6 fica evidente a formação do gel de C-S-H, por meio dos espectros de  $^{29}Si$ , a partir do ajuste do espectro da pasta hidratada.

Os deslocamentos químicos em -80 ppm e -85 ppm correspondem a sítios  $Q^1$  e  $Q^2$  do C-S-H, respectivamente. Já o deslocamento em -72 ppm é referente à fase belita remanescente após a hidratação do cimento. Dados semelhantes têm sido reportados na literatura (WALKLEY e PROVIS, 2019). As larguras dos picos observados em 2,25 ppm são maiores que as das fases cristalinas do cimento

anidro, ou seja, 1,70 ppm para a alita e igualmente para a belita (**Figura 6**). Estes valores de largura correspondem a diferentes estruturas semi-cristalinas do C-S-H devido à existência de defeitos, impurezas e falta de periodicidade espacial dos átomos. Pode-se observar uma redução de intensidade do sinal associado à fase belita residual e ausência do sinal referente à fase alita, esta última, porque a fase teria sido consumida na formação de C-S-H.

## 7 Considerações finais

Com base nos dados de caracterização das fases do cimento anidro e na correspondente pasta hidratada de cimento, podem-se apontar os seguintes dados mais relevantes e considerações em relação a este estudo:

- O cimento anidro é constituído predominantemente pelas fases silicáticas, sendo 55 % de alita e 11,6 % de larnita. O material carbonático presente é constituído por 9,6 % de  $C_aCO_3$ . As fases alumináticas somaram 9,1 %.
- A pasta de cimento hidratado possui como constituinte majoritário do material 60,5 % de fases amorfas que, basicamente, é gel C-S-H. Obteve-se 39,5% de fases cristalinas, com destaque para 5,1 % de larnita residual presente aos 63 dias de hidratação.
- Os silicatos do cimento anidro foram identificados e quantificados proporcionalmente, por meio da técnica de RMN, a partir da observação de sinais de deslocamento químico centrado entre -75 ppm e -77 ppm, os quais estão associados aos polimorfos da alita, enquanto que, o sinal em -71,3 ppm ( $Q^{0''}$ ) foi atribuído à belita.
- O gel C-S-H foi também caracterizado e quantificado por meio da técnica de RMN, a partir da observação de deslocamento químico centrados entre -80 ppm e -85 ppm, correspondendo aos sítios  $Q^1$  e  $Q^2$ , respectivamente.
- A partir dos dados de espectroscopia  $^{29}Si$ -RMN de alta resolução em estado sólido, foi possível analisar e caracterizar a mineralogia dos silicatos anidros e hidratados do cimento Portland. Os espectros de RMN do núcleo de  $^{29}Si$  forneceram informações estruturais que ocorreram durante a hidratação do cimento, que resultou em informações qualitativas e semiquantitativas das unidades tetraédricas dos silicatos, espécies químicas que foram consumidas e formadas.
- Foi possível aplicar a técnica de espectroscopia  $^{29}Si$ -RMN de alta resolução em estado sólido em cimento Portland anidro e hidratado com 2,62 % de  $Fe_2O_3$ , o que inicialmente representava uma limitação potencial em relação ao modelo do equipamento do IPT utilizado neste experimento. Os dados obtidos evidenciam a real possibilidade para aplicação dessa técnica em estudos de materiais cimentícios.

## 8 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pela disponibilização da sua infraestrutura de laboratório e à Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (FIPT) pela bolsa de Iniciação Tecnológica concedida a Thiago Ricardo Santos Nobre no período de 06/2016 à 06/2018. Os autores agradecem igualmente à Dr<sup>a</sup> Maria Alba Cincotto, professora da Poli Civil da USP, pela valiosa interlocução na redação deste artigo.

## 9 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR - 16.697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro: 2012.

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. **A new model for hydrated Portland cement and its practical implications** *Eng J Can*, 53 (8-9) (1970), pp. 53-59.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. Tese de doutoramento (Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

HARRIS, R. K.; MANN, B. E. **NMR and the Periodic Table**. Academic Press, London, 1978.

KLEIN, C. **Manual de ciência dos materiais**. 23<sup>a</sup> ed., Bookman, 2012.

LOTHENBACH, B; NONAT, A. **Calcium silicate hydrates**: Solid and liquid phase composition, *Cement and Concrete Research*, p. 57 - 70, 2015.

MACKENZIE, K. J. D.; SMITH, M. E. **Multinuclear solid-state NMR of inorganic materials**. Oxford: Pergamon, Elsevier Science, 2002.

MASON, J. **Multinuclear NMR**. Plenum Press, 1987.

MEHTA, P. K.; P. J. M. MONTEIRO. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON. 2008.

MULLER, A. C. A.; MITCHELL, J.; MCDONALD, P. J. **Proton nuclear magnetic resonance relaxometry**, In: SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B., A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, CRC Press, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. Atual. São Paulo, PINI, 1997.

PENA, P.; MERCURY, J. M. R.; AZA, A. H.; TURRILLAS, X.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. **Solid-state  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  NMR characterization of hydrates formed in calcium aluminate – silica fume mixtures**, *Journal of Solid State Chemistry*, v. 181, p.1744 – 1752, 2008.

RICHARDSON, I. G. **The calcium silicate hydrates**, *Cement and Concrete Research*, p. 137 – 158, 2008.

RICHARDSON, I. G. **Tobermorite/jennite and tobermorite/calcium hydroxide based models for the structure of C-S-H**: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate,  $\beta$ -dicalcium silicate, Portland cement and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin or silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34, p. 1733-1777, 2004.

SKIBSTED, J. **High-resolution solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy of Portland cement-based systems**, In: SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B., A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, CRC Press 2016.

SCRIVENER, K. L.; WIEKER, W. **Advances in hydration at low, ambient and elevated temperatures**, *9th Int. Conf Chem. of Cem.*, New Delhi, Vol. I, 449–482, 1992.

**STATISTA**. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/>. Acesso em: 05 de junho de 2020.

TAYLOR, H. F. W. **The chemistry of cement**, Ed. Thomas Telford, Londres, 2a. ed., 1997, 459 p.

TENNIS, P. D.; JENNINGS, H. M. **A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes**, *Cement and Concrete Research*, v. 30, p.855 – 863, 2000.

WALKLEY, B.; PROVIS, J. L. **Solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy of cements**. *Materials Today Advances*, v 1, 2019.

WITTMAN, F. H. **Creep and shrinkage mechanisms**. In: BAZANT, Z. P. WITTIMAN, F. H. (eds). *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, 1982.

YOUNG, J. F. **Physical Mechanisms and their Mathematical Descriptions**. In: BAZANT, Z. P. (ed). *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*, 1988.

## 10 Bibliografia Complementar

ABREU, R. F.; SCHNEIDER, J. F.; CINCOTTO, M. A. **Structure and hydration kinetics of silica particle in rice husk ash studied by Si-29 high-resolution nuclear magnetic resonance.** Journal of the American Ceramic Society, v.88, p 1514-1520, 2005.

ANDERSEN, M. D.; JACKOBSEN, H. J.; SKIBSTED, J. **Characterization of white portland cement hydration and the C-S-H structure in the presence of sodium aluminate by  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  MAS spectroscopy.** Cement and Concrete research, v.34, p 857-868,2004.

CINCOTTO, M. A. **Reações de hidratação e pozolânicas.** In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 381-413.

CINCOTTO, M. A.; SCHNEIDER, J. F.; OLIVEIRA, C. T. A.; PANEPUCCI, H. C.; AGOPYAN, V. **Caracterização do silicato de cálcio hidratado em pastas de escória de alto forno ativada e cimento Portland com  $^{29}\text{Si}$  em RMN de alta resolução.** In: 5° Congresso Brasileiro de Cimento (CBC).1999.

FITZGERALD, J. J.; DePAUL, S. M. **Solid-State NMR Spectroscopy of Inorganic Materials: An Overview.** American Chemical Society, 1998.

NOBRE, T. R. S. **Reidratação de pastas de cimento desidratadas.** 7° Congresso Brasileiro do Cimento. São Paulo, 2016.

PINTO, C. A. **Estudo da Estabilização Por Solidificação de Resíduos Contendo Metais Pesados.** 229 f. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PORTENEUVE, C.; KORB, J. P.; PETIT, D.; ZANNI, H. **Structure–texture correlation in ultra-high–performance concrete: A nuclear magnetic resonance study,** Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 1, 2002.

PORTENEUVE, C.; ZANNI, H.; VERNET, C.; KJELSEN, K.; KORB, J. P.; PETIT, D. **Nuclear magnetic resonance characterization of high- and ultrahigh–performance concrete: Application to the study of water leaching,** Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 12, 2001.

QUARCIONI, V.A. **Influência da cal nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta.** Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica – USP, 2008, 172 p.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in the concrete science technology: principles, techniques and applications.** Ottawa: Noyes Publications, 1999.

ROTTSTEGGE, J.; WILHEM, M.; SPIESS, H. W. **Solid state NMR investigations on the role of organic admixtures on the hydration of cement pastes.** Cement and concrete composites, 10p, 2006.

SCHNEIDER, J.; CINCOTTO, M. A.; PANEPUCCI, H.  **$^{29}\text{Si}$  and  $^{27}\text{Al}$  high-resolution NMR characterization of calcium silicate hydrate phases in activated blast-furnace slag pastes,** Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 7, 2001.

SEVELSTED, T. F.; HERFORT, D.; SKIBSTED, J.  **$^{13}\text{C}$  chemical shift anisotropies for carbonate ions in cement minerals and the use of  $^{13}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR in studies of Portland cement including limestone additions,** Cement and Concrete Research, Volume 52, 2013.

SKIBSTED, J.; JACKOBSEN, H. J. **Quantification of calcium Silicate Phases in Portland Cements by  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR spectroscopy.** J. Chem. Soc. Faraday Trans, 91, p 4423-4430, 1995.

## 11 Destaques

- Uso de NMR núcleo  $^{29}\text{Si}$  em cimento Portland com  $\sim 3\%$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- Identificação das fases belita e alita  $\text{Q}^0$  no cimento anidro, compostos comumente majoritários do cimento Portland
- Identificação de  $\text{Q}^1$  e  $\text{Q}^2$  após a hidratação do cimento Portland, referentes ao C-S-H
- Quantificação de 60 % de material amorfo, típico do C-S-H, por DRX, na pasta de cimento hidratada.

10.34033/2526-5830-v6n19-4



## Artigo técnico

Medição da Composição dos  
“Gases” de Combustão.*Measurement Of Flue Gas Composition.*Renato Vergnhanini Filho<sup>a\*</sup>

## Resumo

Em processos industriais de combustão é inevitável a emissão de gases que, tratados ou não, são lançados na atmosfera. O conhecimento da composição desses gases é essencial para a segurança, operação e otimização do processo, bem como para o controle da poluição ambiental. Neste texto estão abordados instrumentos e métodos descontínuos, contínuos e semicontínuos para a medição dos constituintes mais comuns dos gases.

## Abstract

*In industrial combustion processes, the emission of gases which, treated or not, are released into the atmosphere is inevitable. The knowledge of the composition of these gases is essential for the safety, operation, and optimization of processes, as well as for the control of environmental pollution. This text discusses discontinuous, continuous, semi-continuous instruments and methods for measuring the most common constituents of gases.*

<sup>a</sup> Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética (LBE), Unidade de Negócios: Energia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\* E-mail: vergnhan@ipt.br

Palavras-chave: gás de combustão; combustão; medição da composição do gás de combustão.

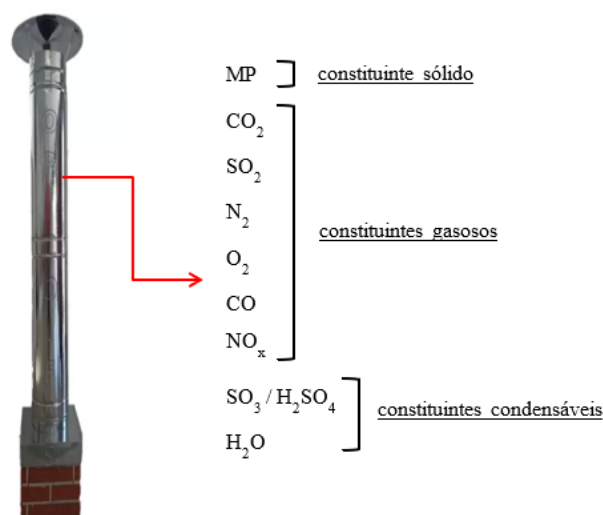
*Keywords: flue gas; combustion; measurement of flue gas composition.*

## 1 Introdução

Em processos industriais de combustão é inevitável a emissão de gases que, tratados ou não, são lançados na atmosfera. O conhecimento da composição desses gases é essencial para a segurança, operação e otimização do processo, bem como para o controle da poluição ambiental.

As substâncias que compõem os gases de combustão, assim como a participação delas na mistura, são função do combustível, e do equipamento utilizado e sua condição de operação. Os constituintes mais comumente encontrados nesses gases em quantidades mensuráveis são: oxigênio ( $O_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ), água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), material particulado ( $MP$ ), óxidos de enxofre ( $SO_x$  -  $SO_2$  e  $SO_3$  /  $H_2SO_4$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$  -  $NO$  e  $NO_2$ ). Esses constituintes são geralmente descarregados no ar ambiente no estado gasoso, exceto o  $MP$ , no estado sólido, e a  $H_2O$  e o  $SO_3$  /  $H_2SO_4$ , no estado líquido ou gasoso, dependendo basicamente da temperatura (Figura 1).

Figura 1 – Constituintes mais comuns dos gases de combustão



Fonte: Elaborado pelo autor

Os gases podem conter outros constituintes menos comuns, específicos da queima de determinados combustíveis ou de determinados processos de combustão como, por exemplo, as dioxinas e os furanos, que são gerados na queima de compostos clorados ou a acroleína, formada na combustão da glicerina, subproduto da produção do biodiesel. Podem conter, ainda, outros compostos, quando há contato direto dos gases de combustão com as matérias primas que estão sendo processadas ou com os produtos produzidos - por exemplo, em um forno de cimento típico há arraste de clínquer pelos gases.

Neste texto, estão abordados apenas instrumentos e métodos para a medição daqueles constituintes dos gases que foram apresentados anteriormente como sendo os mais comuns.

## 2 Instrumentos e métodos para a medição da composição dos gases de combustão

Os instrumentos e métodos para a medição da composição dos gases de combustão, dependendo do critério utilizado, podem ser divididos em: via seca ou úmida; mono ou multicomponentes; portáteis ou fixos; descontínuos, contínuos ou semicontínuos. Neste texto, eles são apresentados considerando essa última classificação.

Tem-se conhecimento de cerca de 60 empresas no Brasil que fabricam ou representam fabricantes ou apenas comercializam instrumentos de medição da composição dos gases de combustão.

### 2.1 Instrumentos e métodos descontínuos

#### 2.1.1 Analisadores por absorção (para O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CO)

Exemplos de analisadores de gases por absorção são o aparelho de Orsat e os portáteis *Fyrite* ou *Bacharach* (apenas para O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>), mais conhecidos por essas denominações, embora sejam apenas nomes comerciais. Tais instrumentos tiveram, no passado, uso generalizado; atualmente, porém, com o surgimento de opções mais precisas, de emprego menos trabalhoso e a preços acessíveis, sua utilização é quase que restrita às indústrias de menor porte, na regulagem de seus equipamentos de combustão. A **Figura 2** traz ilustrações desses instrumentos.

**Figura 2 – Analisadores descontínuos por absorção**



Fonte: a) IndiaMART InterMESH Ltd.  
b) OMNI Controls Inc.

No Brasil, no final do século passado, na época das chamadas crises do petróleo, quando proliferaram pelo país processos de gaseificação, surgiram aparelhos de Orsat equipados, também, com câmara de combustão catalítica. Na câmara, os gases são queimados, o hidrogênio ( $H_2$ ) e o metano ( $CH_4$ ) presentes convertidos a  $H_2O$  e  $CO_2$ . A quantidade formada desses últimos, medida por absorção, indica a concentração de  $H_2$  e  $CH_4$  na amostra.

### 2.1.2 Escala de Ringelmann (para MP)

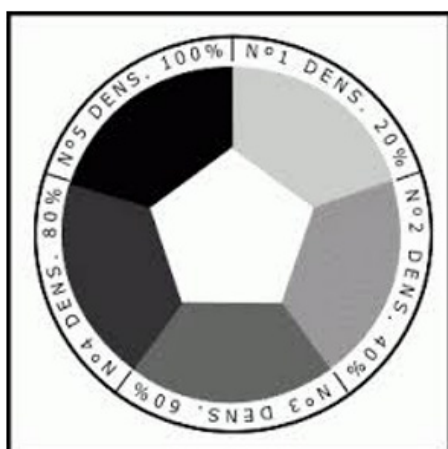
A escala de Ringelmann é uma escala gráfica constituída por seis padrões, numerados de 0 a 5, com variações uniformes de tonalidades entre o branco e o preto. Avalia-se a concentração de MP dos gases, comparando-se a sua coloração com os padrões da escala. Atualmente, porém, seu uso está praticamente restrito à avaliação da qualidade da combustão de motores veiculares (Figura 3).

### 2.1.3 Smoke test (para MP)

O *smoke test*, conhecido por esse nome pela indústria, trata-se de instrumento fabricado originalmente pela *Bacharach* e outrora bastante empregado para ajuste da combustão. Na sua utilização, os gases são aspirados por uma bomba manual atravessando um papel de filtro; a mancha escura deixada no filtro pelo MP depositado é comparada a manchas classificadas de 0 a 9, em ordem crescente de intensidade (Figura 4). Da mesma forma que os analisadores por absorção, seu uso atualmente é mais comum nas indústrias de pequeno porte.

Figura 3 – Escala de Ringelmann

a) Escala de Ringelmann



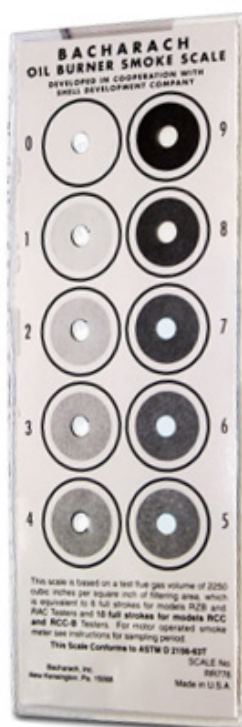
b) Medição utilizando a escala



Fonte: a) Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios de Toledo

b) AZTECA Software Ltda.

Figura 4 – Smoke test

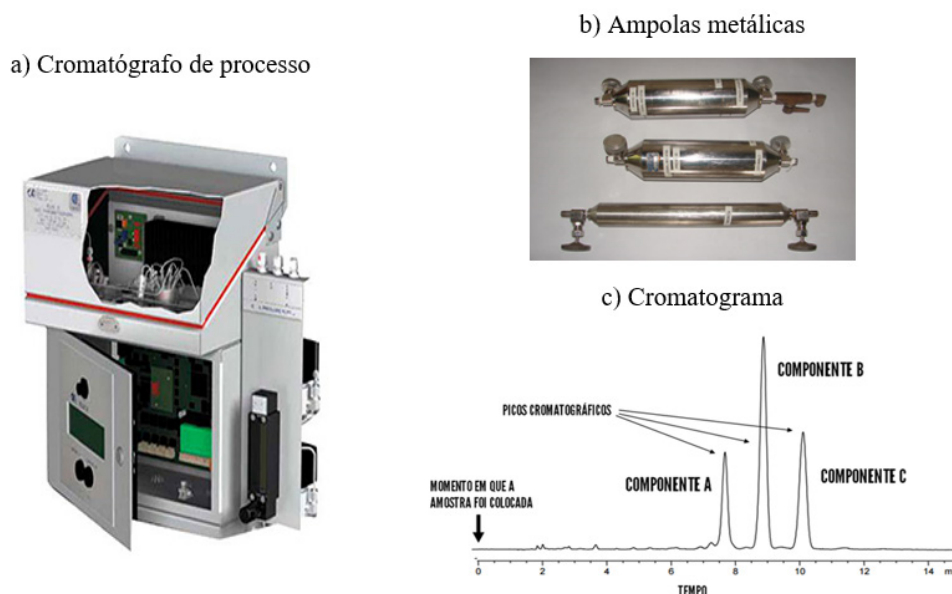


Fonte: MSA Safety Incorporated

### 2.1.4 Cromatógrafo (para constituintes gasosos dos gases)

A técnica de medição (cromatografia gasosa) consiste na coleta de uma amostra dos gases, utilizando ampolas metálicas ou *bags*, seguida de sua introdução em um cromatógrafo. Nele, a amostra passa por colunas cromatográficas, onde seus constituintes são separados e, na sequência, quantificados por detectores específicos para cada componente. Os resultados da análise são mostrados em um cromatograma, que é um registro gráfico que expressa os constituintes da amostra e suas respectivas concentrações. Vem avançando bastante o emprego pela indústria dos chamados cromatógrafos de processo ou cromatógrafos *on-line*, que fornecem uma medição praticamente contínua – instalados junto ao duto de gases, as amostras são automaticamente e seguidamente coletadas e analisadas (Figura 5).

Figura 5 – Cromatografia gasosa



Fonte: a) Engezer Produtos e Servicos Ltda.  
b) e c) elaborado pelo autor

### 2.1.5 Métodos EPA (para todos os constituintes dos gases)

A Agência Ambiental dos Estados Unidos (EPA) prescreve métodos de medição da concentração da totalidade dos constituintes dos gases de combustão (U.S. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1991). Para atender à exigência dos órgãos de controle ambiental nacionais, as indústrias contratam regularmente empresas especializadas em medições em chaminés que utilizam esses métodos. Tem-se conhecimento de cerca de 60 empresas no Brasil que prestam esse tipo de serviço.

Por exemplo, para  $H_2O$ ,  $NO_x$  e  $SO_x$  há os métodos EPA números 4, 7 e 8, respectivamente. Para MP, os métodos EPA números 5 (5A, 5B, 5C, 5E, 5F, 5G, 5H) e 17, sendo o no 5 o mais empregado atualmente pelas indústrias no Brasil, porque é o que consta, geralmente, nas suas Licenças de Operação (L.O.). A tendência, porém, é que ele, progressivamente, seja substituído pelo nº 17, que é mais preciso ("o MP coletado fica retido exclusivamente no filtro") e mais seletivo ("compostos do tipo  $H_2SO_4 \cdot nH_2O$  não são computados como MP").

Os métodos EPA mencionados para a medição da concentração de MP dos gases podem ser utilizados, também, para a coleta representativa de MP para análises laboratoriais de caracterização, tais como: análises imediata e elementar, distribuição granulométrica, morfologia etc.

A **Figura 6** e a **Figura 7** mostram os equipamentos prescritos nos métodos EPA números 5 e 17, respectivamente.

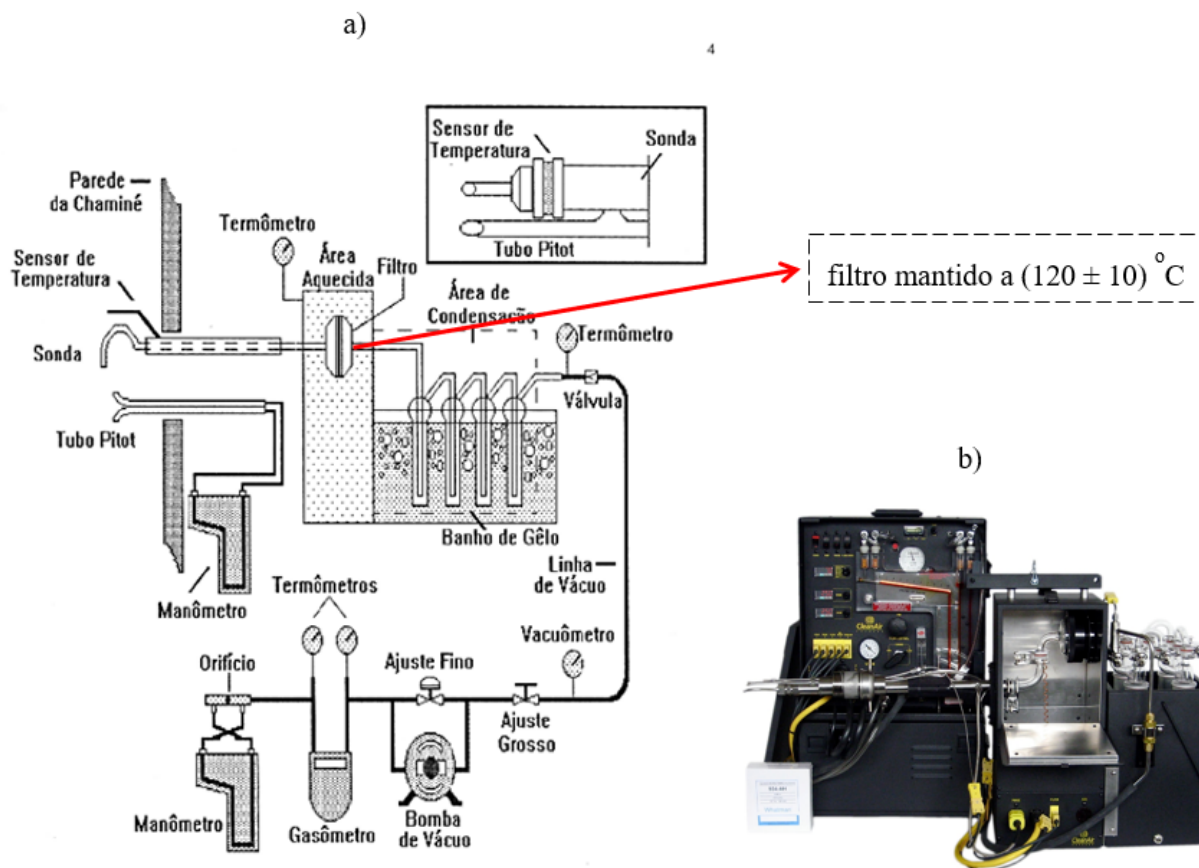
### 2.1.6 Impactador cascata (para MP - distribuição granulométrica)

O instrumento se presta à determinação da distribuição granulométrica do MP presente nos gases de combustão. Os gases passando, sequencialmente, por um conjunto de placas metálicas perfuradas - cada uma contendo certo número de furos e com furos de determinado diâmetro, vai desprendendo o MP presente em pratos metálicos, montados após cada placa, de forma progressiva e na ordem decrescente de tamanho. Como cada prato coleta partículas de determinada faixa de diâmetro, concluída a amostragem basta pesar o MP depositado em cada prato (**Figura 8**).

## 2.2 Instrumentos e métodos contínuos (para MP e constituintes gasosos dos gases)

Os analisadores contínuos de gases são classificados em in-situ e extrativos, e os sistemas de monitoramento de emissões que utilizam instrumentos desse tipo são denominados de CEMS (Continuous Emissions Monitoring Systems). Alternativamente à medição direta das emissões, os resultados podem ser estimados por meio de cálculos e modelos, simples ou muitas vezes bastante complexos, que os relacionam com características do equipamento de combustão, variáveis do processo (vazões, temperaturas, pressões) e propriedades do combustível, e que são aferidos por meio de medições - nesse caso, o sistema é denominado de PEMS (*Predictive Emissions Monitoring Systems*).

Figura 6 – Equipamento prescrito no método EPA nº 5



Fonte: a) Energética Ind. e Com. Ltda.

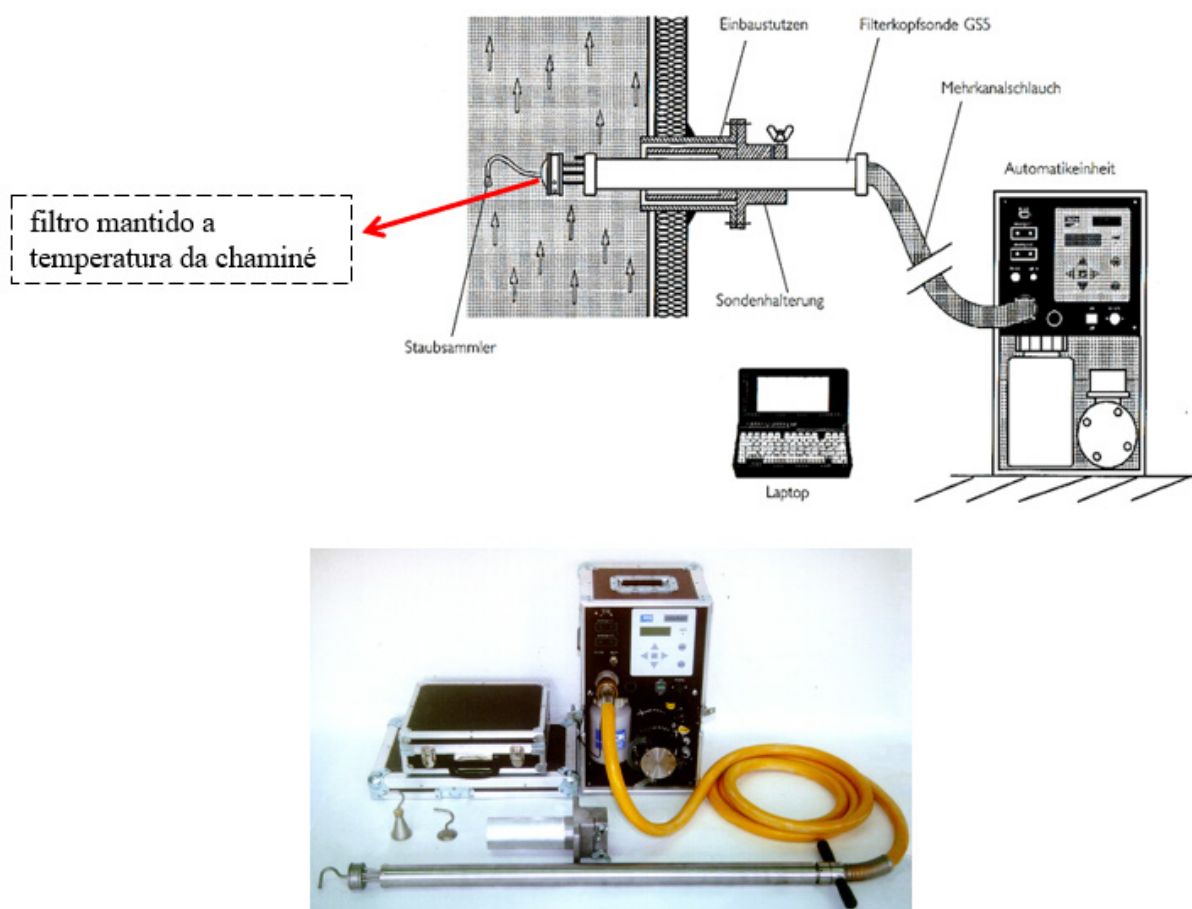
b) Clean Air Engineering

### 2.2.1 Analisadores contínuos *in-situ*

Os analisadores contínuos *in-situ* são montados diretamente no duto de gases e não necessitam que haja qualquer tipo de condicionamento da amostra como, por exemplo, remoção de MP e condensáveis, e redução de temperatura (Figura 9).

Eles são classificados em dois tipos. Nos instrumentos do primeiro tipo, os gases entram em contato diretamente com a célula de medição e o mais empregado deles se destina à medição de  $O_2$ . Sua operação se baseia na geração em uma célula eletroquímica de uma corrente ou tensão proporcional ao teor de oxigênio da amostra e é conhecido pela indústria simplesmente por analisador por óxido de zircônio - denominação que vem do fato do eletrólito sólido utilizado ser de óxido de zircônio (Figura 10).

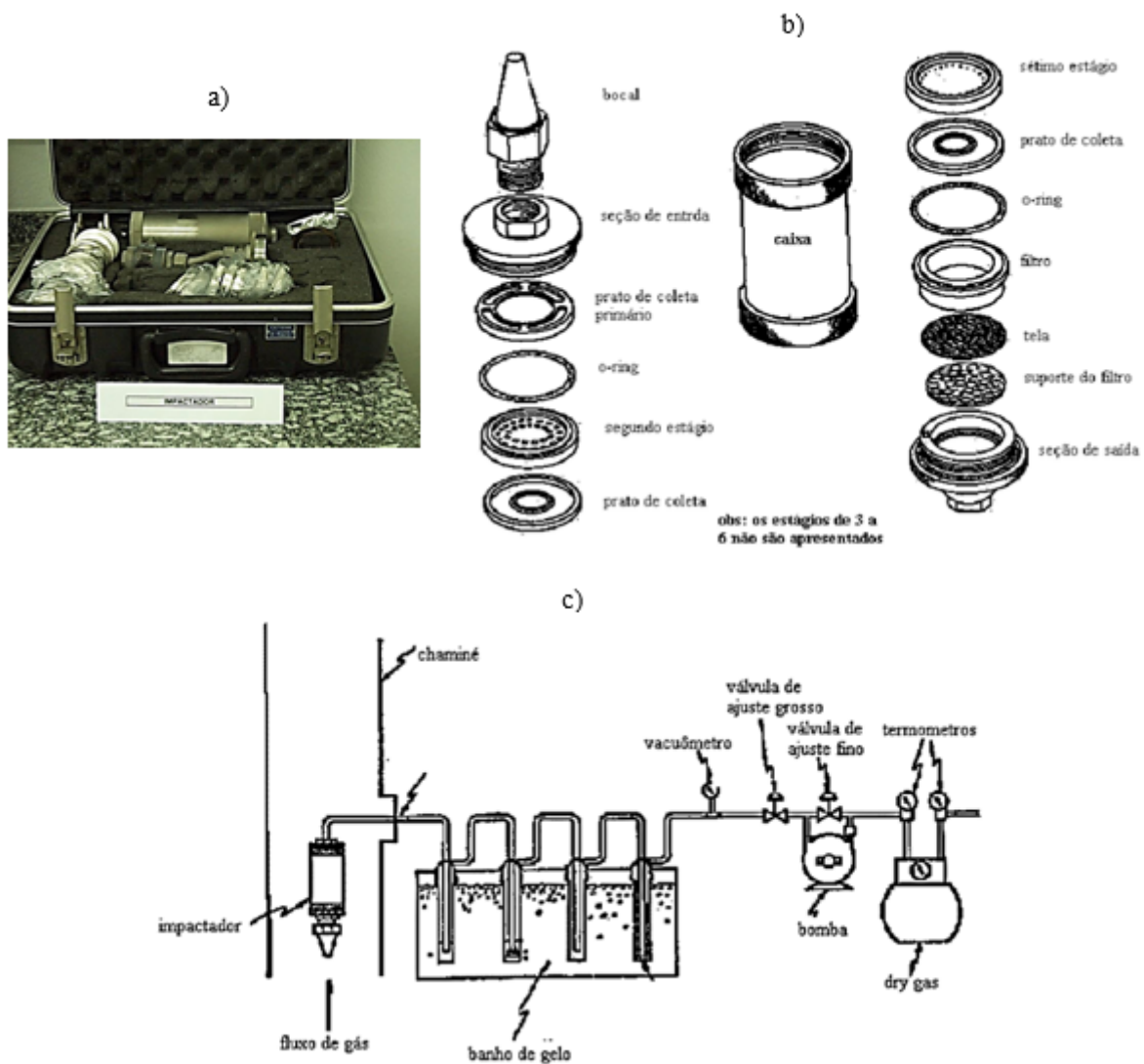
Figura 7 – Equipamento prescrito no método EPA nº 17



Fonte: Sick AG

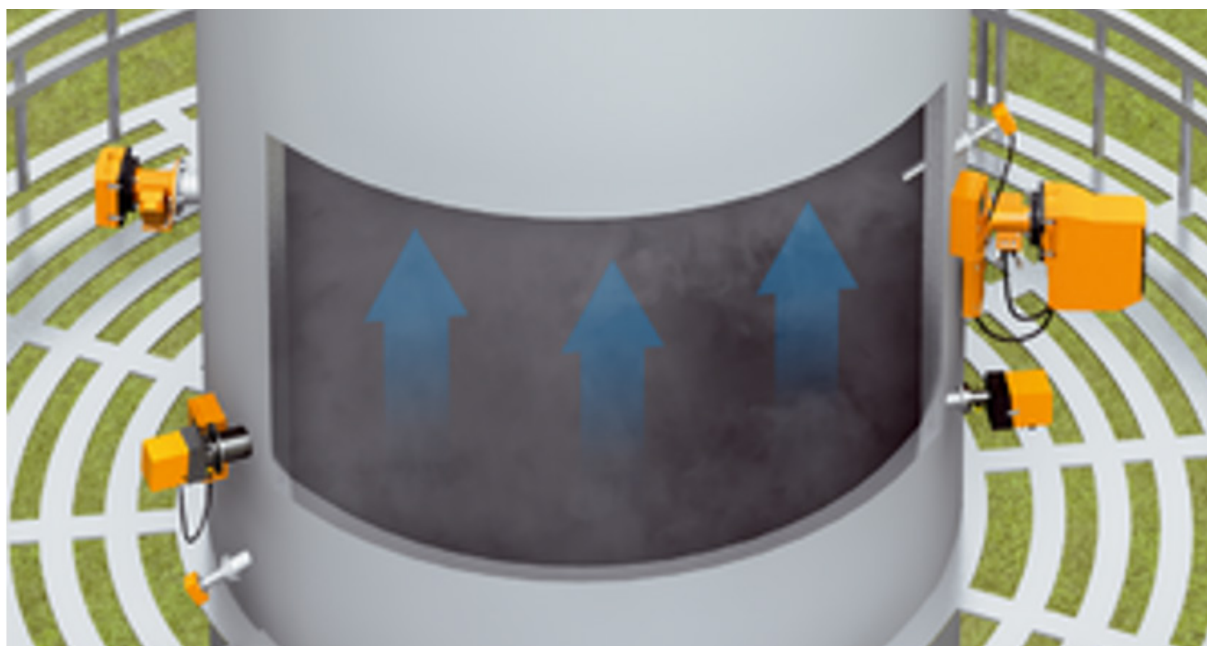
Nos analisadores do segundo tipo, a diferença é que neles não há contato da célula de medição com os gases. Há versões tanto para montagem em um único lado do duto de gases como para instalação em lados opostos (versão denominada de *cross-duct*). Para a medição dos constituintes gasosos dos gases, os instrumentos mais modernos, conhecidos pela sigla TDLS (*Tunable Diode Laser Spectrometer* - Espectrômetro de diodo laser ajustável), baseiam-se na espectrometria por absorção - o sistema opera medindo a quantidade de luz que é absorvida (perdida) quando passa através da amostra (Figura 11).

Figura 8 - Impactador cascata



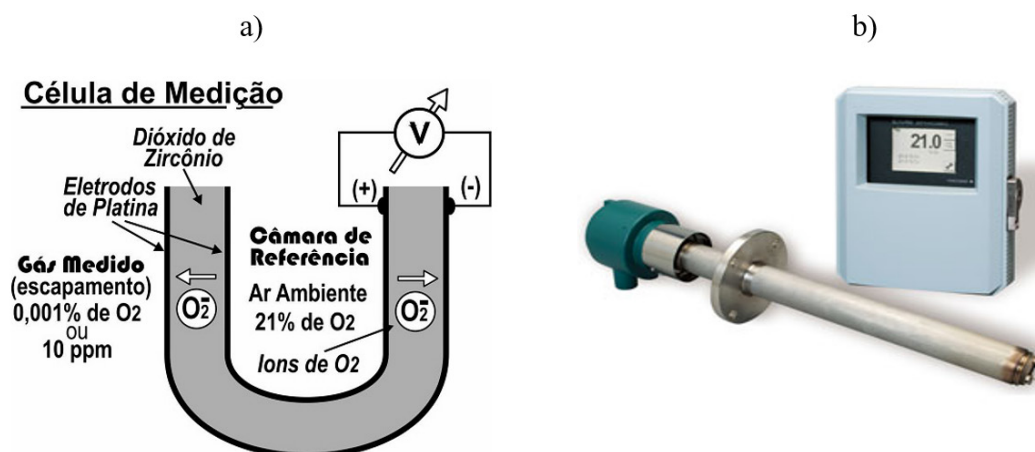
Fonte: a) Elaborado pelo autor  
 b) Elaborado pelo autor  
 c) University of Washington

Figura 9 – Analisadores *in-situ*



Fonte: Sick AG

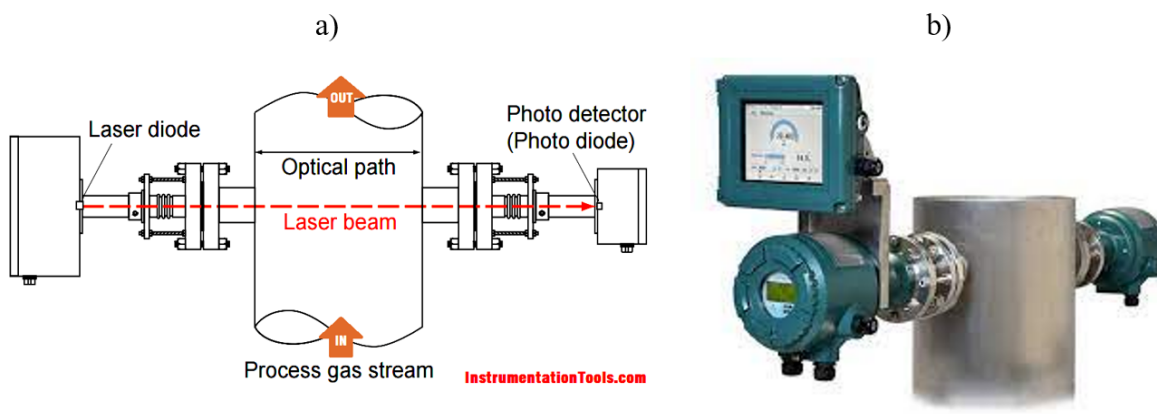
Figura 10 – Analisador utilizando óxido de zircônio



Fonte: a) Grupo Oficina Brasil  
b) Yokogawa América do Sul

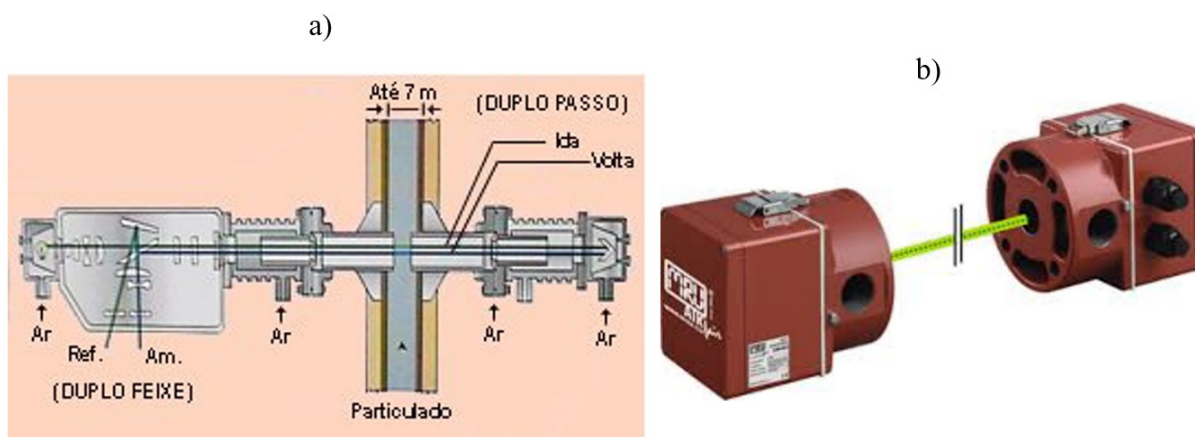
Para a medição de MP, o princípio de operação desses analisadores se baseia na interação (absorção, reflexão, difração ou refração) de um feixe de luz de características definidas com o MP presente nos gases. Eles costumam ser denominados genericamente por opacímetros e necessitam ser calibrados ou parametrizados, utilizando-se um daqueles métodos EPA para MP apresentados anteriormente, para que os resultados sejam expressos como "concentração de MP" (Figura 12).

Figura 11 – Analisador TDLS



Fonte: a) Instrumentation Tools  
b) Yokogawa América do Sul

Figura 12 – Opacímetro



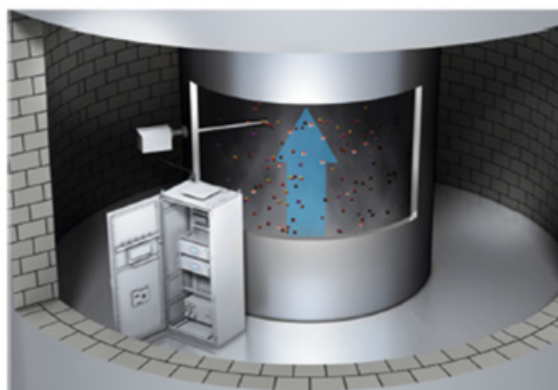
Fonte: a) Digimed Analítica Ltda.  
b) Confor Instrumentos de Medição Ltda.

## 2.2.2 Analisadores contínuos extrativos (para constituintes gasosos dos gases)

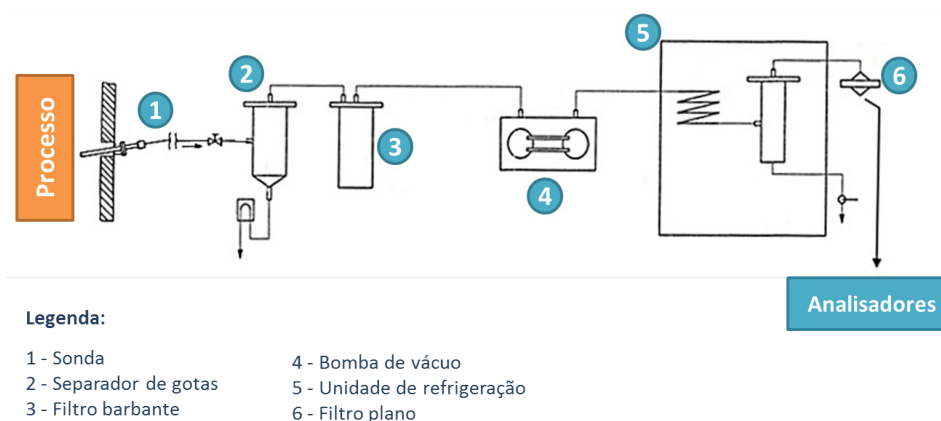
Nos analisadores contínuos extrativos, os gases devem ser admitidos isentos de sólidos e líquidos, e a temperatura próxima a ambiente, ou seja, requerem que eles sejam condicionados. Numa montagem típica, o sistema de análise se constitui de: sonda (refrigerada ou não), linha de amostragem, bomba de vácuo, filtros de um ou mais tipos (barbante, plano, cartucho), condensador (tipo Peltier, por exemplo) e um ou mais analisadores, montados em série ou paralelo (Figura 13).

Figura 13 – Analisadores extrativos

a)



b) Sistema de sucção e condicionamento de amostra típico



Fonte: a) Sick AG

b) elaborado pelo autor

Uma das vantagens dos analisadores extrativos comparado aos *in-situ* é que eles permitem a possibilidade de se medir a composição dos gases em mais de um ponto ou em mais de um equipamento com um único conjunto de sucção e condicionamento de amostra, e de analisadores. Para isso, bastam instalar uma sonda em cada ponto de medição, linhas de amostragem ligando cada ponto ao sistema de condicionamento e um mecanismo de chaveamento manual ou automático na entrada do sistema de condicionamento de forma que a composição dos gases em cada ponto seja lida sequencialmente. São vários os princípios de operação desses analisadores; por exemplo:

- para  $\text{NO}_x$  o princípio usual é o de quimiluminescência - baseia-se na emissão de luz pela amostra que, por alguma maneira, passou do seu estado fundamental para um estado excitado;

- para CO<sub>2</sub>, CO e SO<sub>2</sub>, absorção da radiação infravermelha não dispersiva (princípio conhecido pela sigla NDIR - *Non-Dispersive Infrared Radiation*) e
- para O<sub>2</sub>, suscetibilidade magnética - baseia-se na atração da amostra por um campo magnético (o O<sub>2</sub> é o único constituinte dos "gases" que é paramagnético) ou célula eletroquímica.

### 2.3 Instrumentos e métodos semicontínuos (para O<sub>2</sub>, CO e NO)

Analísadores contínuos, geralmente do tipo portátil, adequados apenas para curtos períodos de medição, sob risco de saturação da célula, costumam receber a denominação de semicontínuos. Eles medem, efetivamente, apenas os teores de O<sub>2</sub>, CO e NO dos gases, utilizando células eletroquímicas. Porém, costumam calcular ou estimar, baseados em uma série de premissas e hipóteses, e no tipo de combustível que o usuário seleciona entre os disponíveis no painel, as concentrações de vários outros constituintes dos gases, como CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, o excesso de ar de combustão, e as vazões relativas de ar e gases de combustão. Alguns desses instrumentos trazem, solidário a sonda de amostragem, um termopar e aí indicam, também, a temperatura dos gases, a potência térmica perdida pelos gases e o rendimento energético do equipamento de combustão. Os valores medidos e calculados, ou estimados, por esses analisadores são mostrados no painel e alguns os apresentam, também, na forma de um registro em papel.

Observa-se que tais instrumentos substituíram, em boa parte, os descontínuos por absorção, citados anteriormente, utilizados nas empresas de menor porte; já nas maiores, prepondera o emprego dos analisadores contínuos. A **Figura 14** mostra exemplos de analisadores semicontínuos.

## 3 Experiência do IPT na análise de "gases" de combustão

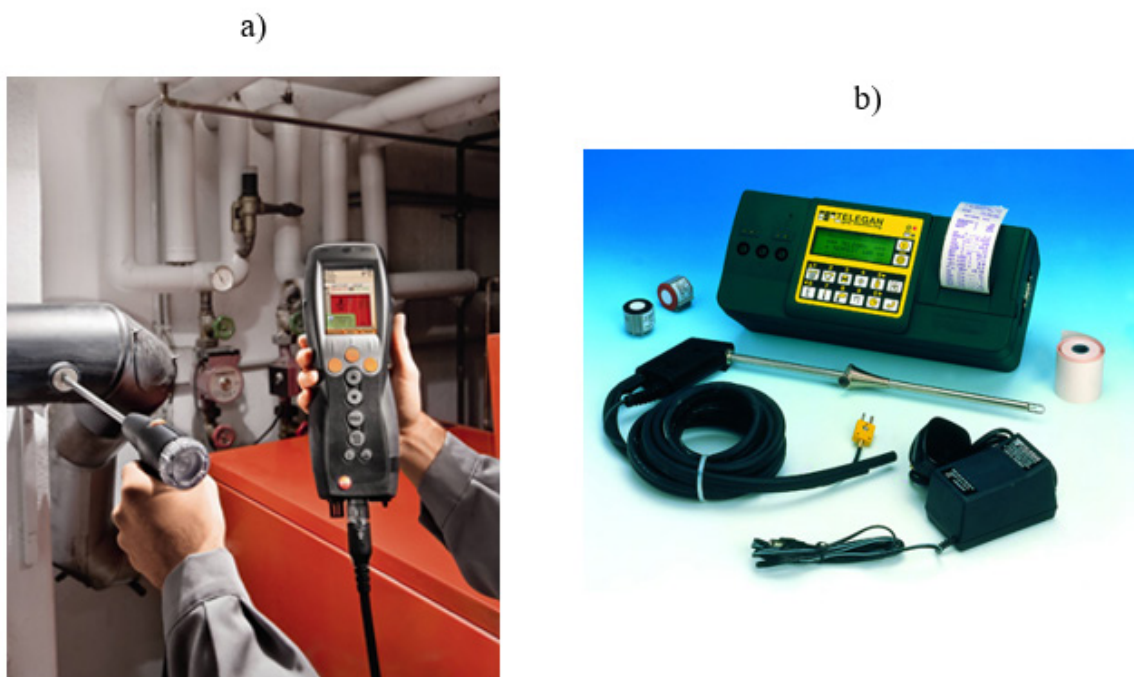
Nos trabalhos realizados na área de combustão industrial, seja no IPT, de pesquisa e desenvolvimento, seja na indústria, envolvendo otimização energética e redução da emissão de poluentes atmosféricos, é usual a necessidade do conhecimento da composição dos gases gerados nos equipamentos.

Na **Figura 15**, são mostrados analisadores de "gases" instalados na unidade móvel do LBE, na **Figura 16**, parte da instrumentação instalada no galpão do LBE e na **Figura 17**, a equipe do IPT realizando medições da composição de gases de combustão.

A experiência do LBE no manejo de analisadores de gases de combustão dos mais variados tipos, adquirida nos cerca de quarenta anos de existência do grupo, vem permitindo a prestação de assessoria

a indústria na especificação, montagem e avaliação de sistemas de análise, e a apresentação de cursos sobre o tema, nas modalidades aberta e *in-company*. Por exemplo, há quatro anos vem sendo apresentado o curso "Análise de gases de combustão na indústria: o que medir, para que medir, como medir" na modalidade aberta.

Figura 14 – Analisadores semicontínuos



Fonte: a) Testo do Brasil – Instrumentos de Medição Ltda.  
b) KEISON International Limited.

Figura 15 – Unidade móvel do LBE com analisadores de gases montados em seu interior



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 16 – Analisadores de gases instalados no galpão do LBE



Fonte: elaborado pelo autor

### 3 Observações finais

Nas frequentes idas do IPT às indústrias, tem-se notado que a instalação de sistemas de análise de gases em seus equipamentos de combustão está em rápido crescimento. Mas, por outro lado, continuam sendo raros os sistemas que fornecem resultados confiáveis, permitindo que sejam inseridos em malhas de controle ou que sejam utilizados pelos técnicos na operação dos equipamentos. E a causa do problema parece não estar na especificação ou na qualidade dos analisadores, mas em questões mais operacionais, tais como:

- infiltração de ar ambiente entre a sonda de amostragem e a bomba de vácuo ou pela própria bomba, que não é hermética;
- localização do ponto de amostragem num local onde a composição dos gases não é representativa, pela existência de estratificações ou de infiltrações de ar ambiente;
- deficiência na manutenção dos analisadores e dos componentes do sistema de condicionamento dos gases;
- emprego de gases padrão errados na calibração dos analisadores ou mesmo ausência de calibração e
- erro na conversão do valor lido pelo instrumento para o indicado no painel do equipamento de combustão.

Figura 17 – Equipe do IPT realizando medição da composição de gases

a) Medições no galpão do LBE



b) Medições na indústria



Fonte: elaborado pelo autor

## 4 Referências

**AZTECA Software Ltda.** Disponível em: <http://e-licencie.com.br/wp-content/uploads/2019/07/COMO-UTILIZAR-A-ESCALA-DE-RINGELMANN%E2%80%8B.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**CLEAN Air Engineering.** Disponível em: <https://www.cleanair.com/product/method-5-isokinetic-train/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**CONFOR Instrumentos de Medição Ltda.** Disponível em: <https://www.confor.com.br/produto/opa-cimetro-continuo-industrial>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**DIGIMED Analítica Ltda.** Disponível em: <https://www.digimed.ind.br/https://digimed.tripod.com/opa01ab.htm>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**ENERGÉTICA Ind. e Com. Ltda.** Disponível em: [https://www.energetica.ind.br/wp-content/uploads/2016/01/env1\\_40cfr60\\_apa\\_met5\\_det\\_emis\\_part\\_fontes\\_estacionarias.pdf](https://www.energetica.ind.br/wp-content/uploads/2016/01/env1_40cfr60_apa_met5_det_emis_part_fontes_estacionarias.pdf). Acesso em: 30 mar. 2022.

**ENGEZER Produtos e Serviços Ltda.** Disponível em: <https://www.engezer.com.br/cromatografos-processo>. Acesso em: 30 mar. 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Code of Federal Regulations (CFR), Title 40:** Protection of Environment, Chapter I: Environmental Protection Agency, Subchapter C: Air Programs, Part 60: Standards of Performance for New Stationary Sources, Appendix A: Test Methods, Jul. 1991.

**GRUPO OFICINA BRASIL.** Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/sensores-de-oxigenio-como-funcionam-e-a-sua-importancia-na-eletronica-do-motor>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**INDIAMART InterMESH Ltd.** Consulta geral a homepage oficial. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/orsat-gas-apparatus-4318620362.html>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**INSTRUMENTATION TOOLS.** Disponível em: <https://instrumentationtools.com/tunable-diode-laser-analyzer-working-principle/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**KEISON International Limited.** Disponível em: [http://www.keison.co.uk/guide\\_fluegasanalysers.shtml](http://www.keison.co.uk/guide_fluegasanalysers.shtml). Acesso em 30.03.2022.

**MSA Safety Incorporated.** Disponível em: <https://www.mybacharach.com/product/true-spot-smoke-scale/>. Acesso em 30.03.2022.

**OMNI Controls Inc.** Consulta geral a homepage oficial. Disponível em: <https://www.omnicontrols.com/product/co2-fyrite-indicator-20-dry/>. Acesso em 30.03.2022.

**SICK AG.** Disponível em [https://www.sick.com/br/pt/medidores-de-particulados/c/g54727?q=:Def\\_Type:ProductFamily&fs=10000#%20benefit\\_2](https://www.sick.com/br/pt/medidores-de-particulados/c/g54727?q=:Def_Type:ProductFamily&fs=10000#%20benefit_2). Acesso em: 30 mar. 2022.

**SICK AG.** Disponível em: <https://www.sick.com/br>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**SICK AG.** Disponível em: [https://www.sick.com/media/docs/6/16/316/Operating\\_instructions\\_GRA-VIMAT\\_SHC502\\_Gravimetric\\_Dust\\_Concentration\\_Measuring\\_System\\_en\\_IM0011316.PDF](https://www.sick.com/media/docs/6/16/316/Operating_instructions_GRA-VIMAT_SHC502_Gravimetric_Dust_Concentration_Measuring_System_en_IM0011316.PDF). Acesso em: 30 mar. 2022.

**SINDICATO DA INDÚSTRIA DE REPARAÇÃO DE VEÍCULOS E ACESSÓRIOS DE TOLEDO.** Disponível em: <https://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindirepatoledo/escala-de-ringelmann-1-11560-301452.shtml>. Acesso em: 20 out. 2021.

**TESTO DO BRASIL – Instrumentos de Medição Ltda.** Disponível em: [https://www.testo.com/pt-BR/produtos/products\\_emission\\_industry](https://www.testo.com/pt-BR/produtos/products_emission_industry). Acesso em: 30 mar. 2022.

**UNIVERSITY OF WASHINGTON.** Disponível em: <http://faculty.washington.edu/mpilat/opman.htm>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**YOKOGAWA América do Sul.** Disponível em: <https://www.yokogawa.com.br/produtos/analísadores-de-processo/analísadores-de-gases/oxigenio-zr402g>. Acesso em: 30 mar. 2022.

**YOKOGAWA América do Sul.** Disponível em: <https://www.yokogawa.com.br/produtos/analísadores-de-processo/analísadores-de-gases/analísadores-de-oxigenio/tdls8000>. Acesso em: 30 mar. 2022.

10.34033/2526-5830-v6n19-5



**IPT**

## Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, 532

Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP

CEP 05508-901

### Central de Relacionamento com o Cliente

(11) 3767-4102/ 4456 / 4091

[ipt@ipt.br](mailto:ipt@ipt.br)

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

### Redes Sociais

[twitter.com/@ipt](https://twitter.com/@ipt)

[youtube.com/IPTbr](https://youtube.com/IPTbr)

[facebook.com/iptsp](https://facebook.com/iptsp)

[instagram.com/ipt\\_oficial](https://instagram.com/ipt_oficial)



| Secretaria de Desenvolvimento Econômico