

# Ferramenta Computacional Integrada para Cálculo Individualizado da Capacidade de Acomodação de Geradores Distribuídos no Sistema Elétrico de Distribuição – ID 9295

**Autor:** *Tiago Rodarte Ricciardi*

**Coautor:** *Heliton de Oliveira Vilibor e Outros*

**Empresa:** *CPFL Energia, UNICAMP, ERA Energy Research and Analytics*

Realization:

instituto  
**abradee**



Host Company:

**CEMIG**



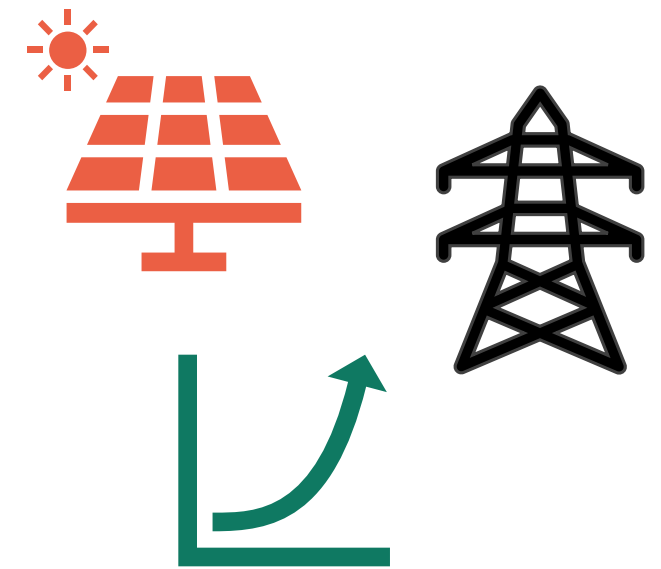
XXV Seminário  
Nacional de  
Distribuição de  
Energia Elétrica

**SENDI**  
**2025**  
BELO HORIZONTE

# Introdução

## Rápido Crescimento da Micro e Minigeração Distribuída

- A micro e minigeração distribuída (**MMGD**) tem crescido de forma expressiva no Brasil: nos **últimos 5 anos** finalizados em 31/12/2024 a quantidade de sistemas e a capacidade instalada **cresceram** a taxas equivalentes da ordem de impressionantes **75% a.a.**
- **Abril/2025:** mais de **3,4 milhões** de sistemas de MMGD instalados, beneficiando mais de **5 milhões** de consumidores, totalizando capacidade instalada de cerca de **39 GW**.
- Apenas no ano de **2024**, foram conectados mais de **850 mil** novos sistemas totalizando cerca de **10 GW** (recorde de conexões anuais).
- O número de solicitações de acesso enviadas às distribuidoras é ainda maior: pedidos que são reprovados ou cancelados ao longo do processo bem como solicitações especulativas.
- Apenas no **grupo CPFL Energia**, o número de solicitações é aproximadamente 2/3 maior do que as unidades instaladas; últimos 12 meses: cerca de **200 mil** solicitações que resultaram em **120 mil** conexões (**1,3 GW**)



**CPFL Energia (Paulista, Piratininga, Santa Cruz e RGE): 1 solicitação a cada 36 segundos, considerando horário comercial**

Realization:

instituto  
**abradee**



Host Company:

**CEMIG**



# Introdução

## Desafio para as Distribuidoras de Energia Elétrica

- Crescente número de solicitações de conexão, impactando no processo de análise técnica e comercial dentro do curto período de resposta estipulado pela agência regulatória.
- Parte crucial dessa análise envolve a determinação da **capacidade de acomodação** de GD (em inglês, **hosting capacity, HC**), baseada nos dados técnicos e respeitando a ordem das solicitações.
- A análise eficiente da capacidade de acomodação é uma das principais preocupações das distribuidoras, tendo em vista o tempo e os recursos humanos empreendidos na análise de cada solicitação.
- Essencial o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que conecte diferentes bases de dados técnicas e comerciais, permitindo o cálculo detalhado e atualizado do HC. A ferramenta deve ainda ser capaz de:
  - ✓ Realizar o **cálculo** da capacidade de acomodação de **redes de média e baixa tensão**;
  - ✓ **Atualizar** os resultados do **cálculo** com **frequência elevada**, idealmente diária;
  - ✓ Considerar a existência de uma **fila de prioridade dos pedidos de conexão**, de forma que os pedidos sejam analisados respeitando a data de solicitação da conexão;
  - ✓ Realizar **cálculo dos custos dos reforços de rede necessários** para aumentar a capacidade de acomodação da rede e permitir determinada conexão.



Realization:

instituto  
**abradee**

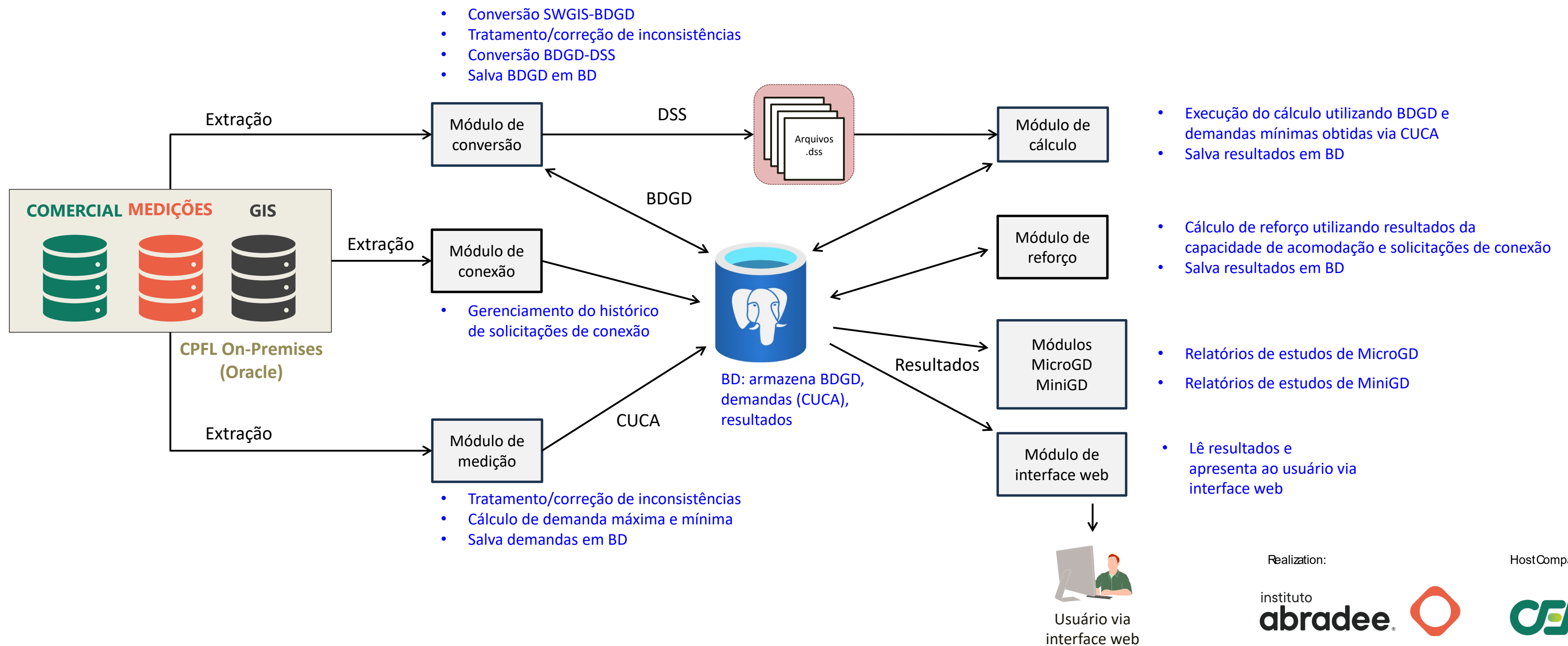


HostCompany:

**CEMIG**

# Desenvolvimento

## 1) Arquitetura Geral da Ferramenta Computacional



Realization:

instituto  
**abradee**



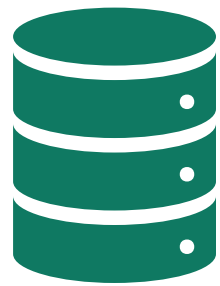
HostCompany:

**CEMIG**

# Desenvolvimento

## 2) Bases de Dados

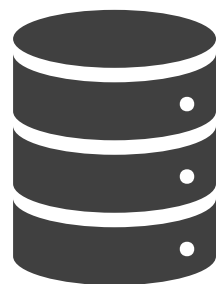
- A maior parte dos dados técnicos e comerciais de interesse para o cálculo da capacidade de acomodação se encontram em tabelas estruturadas em linguagem SQL (*Structure Query Language*).
- Este tipo de linguagem pode armazenar dados em formato texto, numérico ou binário, sendo este último utilizado para dados geográficos. As bases de dados da distribuidora utilizadas pela ferramenta são:



**COMERCIAL:** *base com dados de consumo (energia importada e exportada), serviços de instalação e manutenção, além das solicitações de acesso de MMGD*



**MEDIÇÕES (OPERAÇÃO):** *base com os dados de medições diárias, como potências ativa e reativa, corrente e tensão do início (subestação) e de pontos intermediários (religadoras) dos alimentadores, em intervalos de 15 min*



**GIS:** *base de dados técnica da distribuidora, com dados georreferenciados das redes elétricas, como: capacitores, chaves (fusíveis, religadores etc.), reguladores de tensão de linha, condutores, transformadores, cargas e geradores*



*Adicionalmente, a ferramenta computacional utiliza internamente um banco de dados (BD) PostgreSQL, otimizado para armazenar e consolidar os resultados intermediários dos módulos de conversão, medição, conexão, cálculo e reforço, fornecendo-os prontamente para a interface gráfica quando solicitado pelo usuário.*

Realization:

instituto  
**abradee**



Host Company:

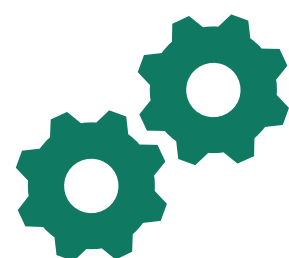
**CEMIG**



# Desenvolvimento

## 3) Módulos de Conversão de Dados

- Duas partes principais: 1) base de dados corporativa para BDGD e 2) conversão da BDGD para o formato do programa OpenDSS (.dss)



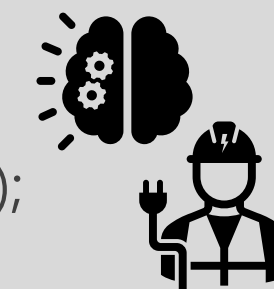
**CONVERSÃO DA BD CORPORATIVA PARA BDGD:** *extração de dados e conversão do formato da base GIS corporativa (Oracle) para a BDGD (armazenada no BD interno da ferramenta), realizada de forma direta, consistindo apenas em mudança da estrutura de tabelas e dados, sem tratamento para detecção e correção de inconsistências nos dados. São importados apenas os dados da rede elétrica e consumidores que são essenciais para o cálculo de HC.*



**CONVERSÃO BDGD-DSS:** *conversão dos dados do formato BDGD para o formato DSS, que é o formato de entrada dos programas OpenDSS e AltDSS (DSS-Extensions), utilizado como motor do módulo de cálculo. Embora seria suficiente realizar a conversão direta da BD corporativa para DSS, optou-se pelo passo intermediário de montagem da BDGD para que a ferramenta se torne mais flexível, podendo ser utilizada mais facilmente pela própria ANEEL em estudos regulatórios ou também por outras distribuidoras.*

### Principais correções de erros/inconsistências:

- ✓ faseamento de condutores, consumidores, transformadores, dentre outros equipamentos;
- ✓ preenchimento de campos com dados faltantes (e.g., parâmetros de transformadores, material de condutor não preenchido etc.);
- ✓ verificação de consistência entre a bitola dos condutores e a carga atendida;
- ✓ cargas e demais componentes ilhados da rede;
- ✓ status de chaves de forma a evitar *loops* no alimentador;
- ✓ conectividade entre níveis de MT em circuitos com classe de tensão A3a e A4;
- ✓ inconsistências entre o tipo de conexão de um banco e o número de equipamentos individuais.



Realization:

instituto  
**abradee**



HostCompany:

**CEMIG**

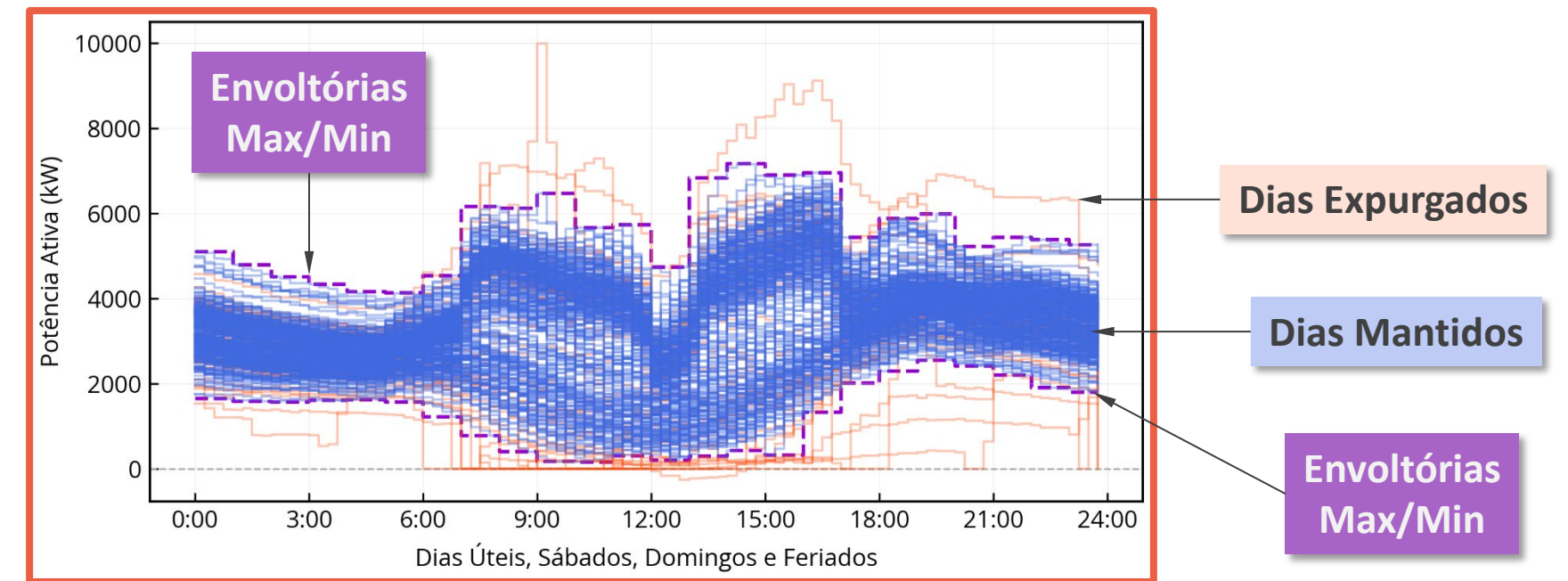


# Desenvolvimento

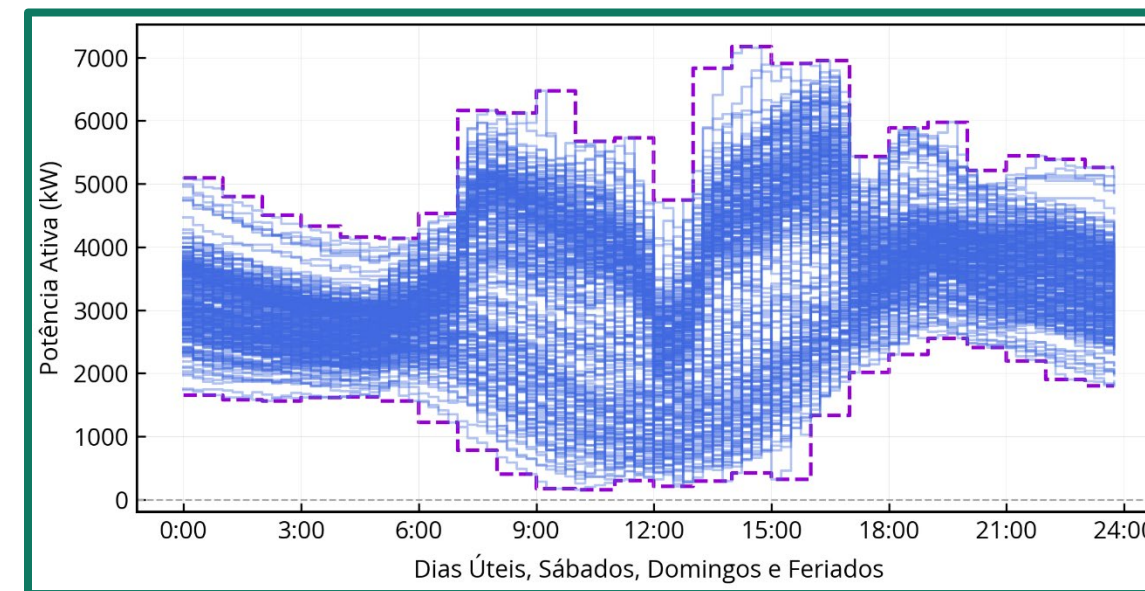
## 4) Módulo de Medição

- Medições obtidas na cabeceira dos alimentadores são utilizadas para determinar o perfil de carregamento do alimentador. É aplicado um processamento com base no histórico de operação dos últimos 12 meses para excluir as medições consideradas anômalas segundo critérios estabelecidos nas normas técnicas da distribuidora.
- A detecção e exclusão de anomalias é realizada por diferentes tipos de métodos estatísticos e analíticos.
- Após exclusão dos dias com eventos anormais, os dias com valores mínimos e máximos de carga são selecionados para os estudos de capacidade de acomodação.

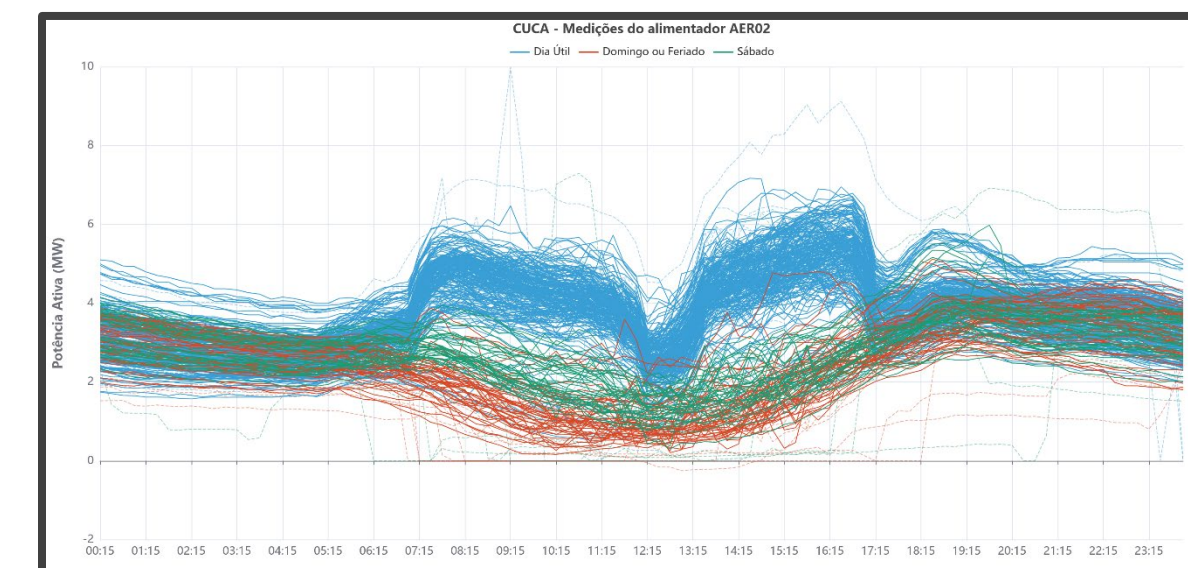
### Medições Brutas



### Medições Processadas



### Medições Classificadas → Cálculo de HC



Realization:

instituto  
**abradee**

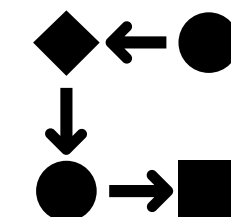


HostCompany:

**CEMIG**

# Desenvolvimento

## 5) Módulo de Conexão



- Processamento da fila de solicitações de conexão utiliza bases de dados **comercial** e de **engenharia (GIS)**:
  - ✓ A **base de dados GIS** é usada para a **seleção de todas as unidades consumidoras**, verificação daquelas que já possuem instalação de MMGD e identificação dos **vínculos de consumidores** com os respectivos pontos de entrega e transformadores de distribuição.
  - ✓ A **base de dados comercial** é usada para a **seleção das solicitações de conexão** de GD e **rastreamento de status** (para determinar em qual passo do processo de análise se encontra a solicitação), a fim de identificar, classificar e ordenar as solicitações de conexão em aberto. Com isso é possível determinar se uma solicitação ainda está em análise (e, portanto, deve ser considerada sua capacidade nos cálculos) e qual solicitação já teve sua análise concluída.
- O estado de uma solicitação depende de quais etapas de análise do processo interno da distribuidora já foram cumpridas, e do tempo (número de dias) desde a última etapa de análise realizada. Após atribuição do estado atual de cada solicitação, a metodologia de processamento também verifica se o prazo (número de dias) entre o último evento de uma solicitação e a data atual ainda não violou o limite de dias para resposta do consumidor, estabelecido na REN 1000, i.e., **120 dias para microgeradores** e **12 meses para minigeradores**.
- As solicitações aprovadas (mas ainda não instaladas) são consideradas no cálculo da capacidade de acomodação. Isto é feito com o objetivo de considerar o impacto das solicitações com alta probabilidade de serem instaladas.

Realization:

instituto  
**abradee**

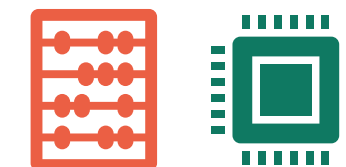


HostCompany:

**CEMIG**



# Desenvolvimento



## 6) Módulo de Cálculo



AltDSS-Python

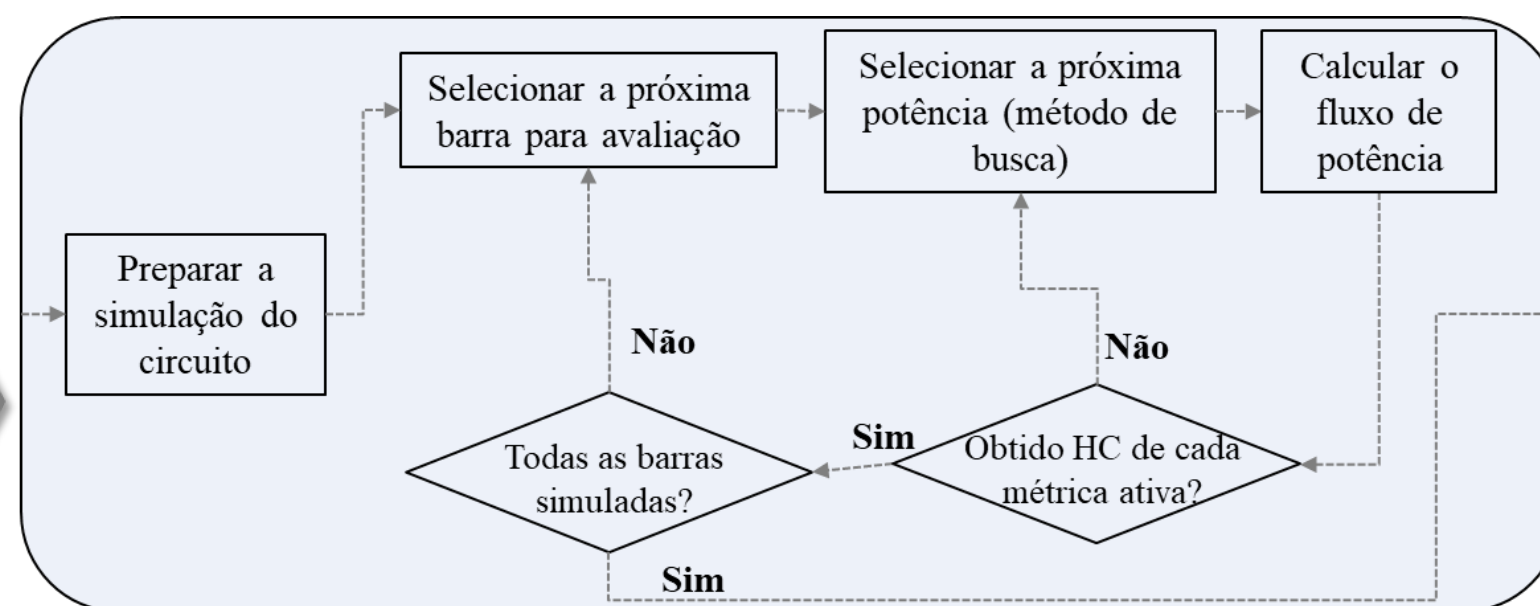
### MÉTRICAS

São utilizadas **três métricas técnicas** no cálculo da capacidade de acomodação de MMGD:

- ✓ **Magnitude de tensão:** avaliar se todas os nós do sistema apresentam valores dentro da faixa adequada (Módulo 8 do PRODIST), i.e., 0.92 a 1.05 pu (BT); 0.93 a 1.05 pu (BT)
- ✓ **Sobrecarga:** avaliar se todos os condutores e equipamentos apresentam carregamento inferior a 100% da respectiva capacidade nominal
- ✓ **Inversão de fluxo de potência ativa:** avaliar se há inversão de fluxo de potência ativa (Art. 73, REN 1000) conforme regras do manual de instruções ANEEL

### Entrada

- Circuito
- Configurações
- Medições
- Métricas



### Saída

- Barras
- Religadores
- Coordenadas (lat, long)
- Resultados por métrica



### DADOS DE ENTRADA

O conjunto de dados de entrada é composto por quatro blocos descritos a seguir:

- ✓ **Circuito:** dados técnicos e geográficos dos elementos do circuito, como linhas, cargas, geradores etc. Estes são fornecidos pelo conversor da BD corporativa para BDGD detalhados no respectivo módulo
- ✓ **Configurações:** conjunto de informações que são utilizadas para preparar e simular o circuito. Estas incluem, por exemplo, número de processos paralelos, método de busca etc
- ✓ **Medições:** valores da base de dados de medição, processados pelo respectivo módulo
- ✓ **Métricas:** valores limites utilizados na verificação das métricas

### MÉTODO DE BUSCA

- O método mais comum existente na literatura é o método de busca linear, em que a potência do gerador é incrementada gradualmente (com passos pré-definidos) até que um ou mais limites técnicos sejam violados.
- Potência dos microgeradores pode variar entre 0 e 75 kW, enquanto a potência dos minigeradores pode variar entre 0 e 5 MW.
- O passo de aumento da capacidade do gerador durante a busca pode ser definido de acordo com as características da distribuidora, sendo definidos passos distintos para redes MT e BT.
- A ferramenta emprega ainda método da busca binária e método da busca secante para acelerar os cálculos

Realization:

instituto  
**abradee**



HostCompany:

**CEMIG**



# Desenvolvimento

## 7) Módulo de Interface Web

- Consiste principalmente na interface gráfica para visualização georreferenciada dos resultados de capacidade de acomodação. A interface inclui os seguintes elementos:

ERAnalytics - Análise de Redes v0.7.1

Geradores

Lista de geradores na fila

Filtrar tabela

Colunas

Fila de solicitações

Código UC	Empresa	Alim.	Dt. nota
			31 de mar. de 2025
			30 de mar. de 2025
			28 de mar. de 2025
			28 de mar. de 2025
			27 de mar. de 2025
			27 de mar. de 2025
			25 de mar. de 2025
			25 de mar. de 2025
			24 de mar. de 2025

171 entradas

Geradores suspeitos

Lista de geradores suspeitos de conexão a revelia

Filtrar tabela

Colunas

Código UC	Empresa	Alim.	Gr. Ten.	Gr. Tar.
			MT	A4
			BT	B1
			BT	B1
			BT	B1
			BT	B1
			BT	B1
			BT	B1

Mapa

Capacidade Hospedagem

5 MW

4 MW

3 MW

2 MW

1 MW

0 MW

Camadas

☒ Subestações

☒ Resultados

☒ Religadores

☐ Chaves

☐ Chaves fusíveis

☐ Seccionadoras

☐ Trafos MT/BT

☒ Trafos MT/MT

☒ Reguladores

☒ Capacitores

☐ Ger. susp. revella

☒ Ger. Instalado

☒ Ger. Aprovado

☒ Ger. Aberto

Informações gerais

Informações das bases de dados

Propriedades do elemento selecionado e navegação no mapa

Posição e elemento selecionado

Conexão de Gerador

Empresa	Paulista
Código	
Localização	
Estado	Instalado (Gerador já instalado)
Situação	ATIVA
Dias após aprovado	
Data da nota	25 de out. de 2023 (há 2 anos)
Data de aprovação (comercial)	27 de out. de 2023 (há 2 anos)
Data de aprovação (técnica)	30 de out. de 2023 (há 1 ano)
Data de aprovação (inspeção)	29 de nov. de 2023 (há 1 ano)
Potência nominal	75.00 kW

Opções de exibição dos resultados

Seleção de critérios de violação e religadores

☒ Religadores fechados

☐ Inversão de fluxo (apenas relig. fechado)

☒ Limite térmico

☒ Magnitude de tensão

Filtros de visualização

Filtragem de alimentadores e subestações específicas para visualização

Empresas

Informações do elemento selecionado

Fatores limitantes

Filtros de visualização

Filtragem de alimentadores e subestações específicas para visualização

Empresas

Paulista

Santa Cruz

RGE

Piratinga

Filtro de alimentadores

Filtro de alimentadores e subestações

Configurações gráficas do mapa

Estilo de mapa e cores

Estilo do mapa

Maptiler Basic

Controle de opacidade do mapa

Estilo do mapa de cor

Viridis

Características do mapa

Realization:

instituto  
abradee

HostCompany:

CEMIG

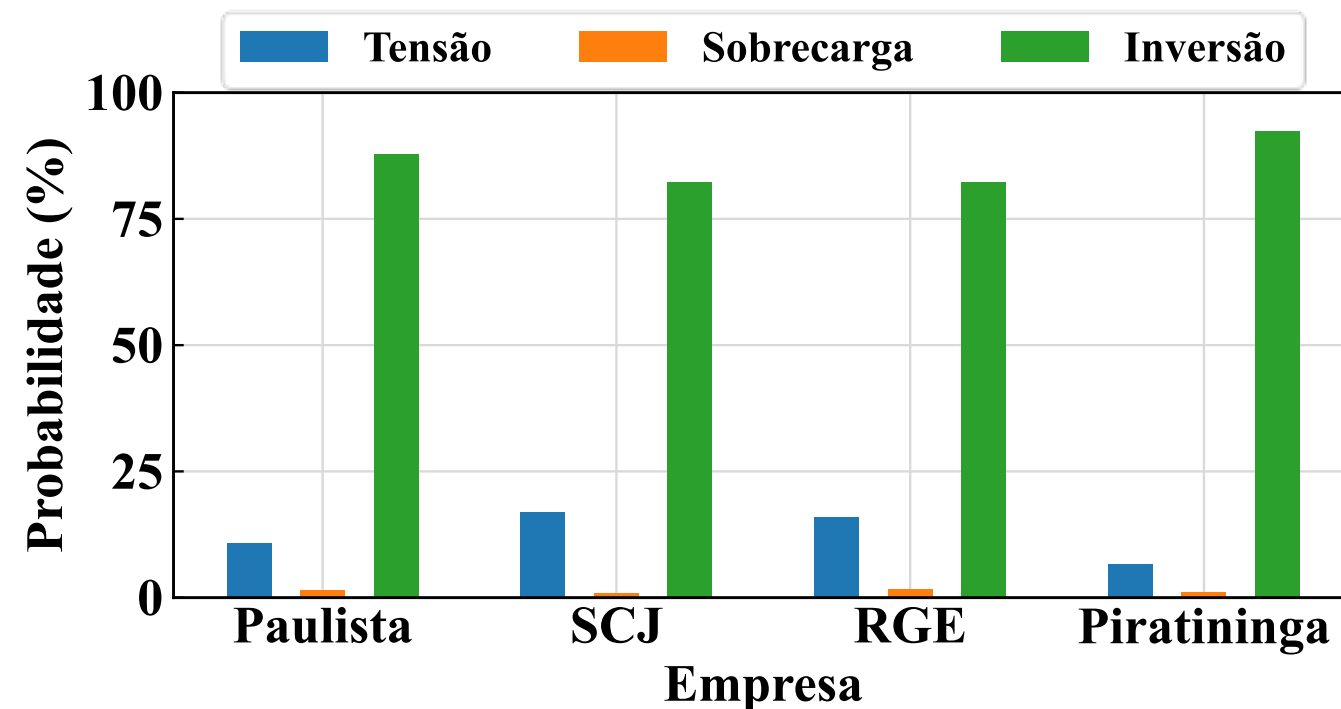


# Desenvolvimento

## 8) Discussão de Resultados

- A metodologia de cálculo de capacidade de acomodação implementada na ferramenta computacional avalia 3.389 alimentadores das 4 distribuidoras do grupo CPFL Energia, sendo totalmente executada em menos de 12 horas.
- O tempo demandado permite que a capacidade de acomodação seja atualizada integralmente com periodicidade diária (por exemplo durante as noites),

Considerando-se magnitude de tensão, a capacidade de acomodação é maior nas regiões mais próximas à subestação



Em relação à capacidade de acomodação, a inversão do fluxo de potência é a métrica mais restritiva, seguida da magnitude de tensão. A sobrecarga de equipamentos é a menos restritiva das métricas consideradas

Realization:

instituto  
**abradee**



HostCompany:

**CEMIG**

# Conclusão

- Neste trabalho técnico foram apresentados detalhes sobre a ferramenta computacional integrada para o **cálculo da capacidade de acomodação de MMGD em desenvolvimento pela CPFL Energia no contexto do Programa de PDI ANEEL**. A ferramenta considera as bases de dados técnicas e comerciais da distribuidora. Verificou-se a abrangente aplicabilidade prática da ferramenta computacional para o cálculo de capacidade de acomodação, tanto em relação à eficiência do tempo de processamento quanto à clareza na visualização gráfica dos resultados.
- **Em relação à capacidade de acomodação, a inversão do fluxo de potência é a métrica mais restritiva atualmente.** A segunda métrica mais restritiva é a magnitude de tensão, seguida da sobrecarga de condutor. É importante ressaltar que as distribuidoras precisam avaliar a capacidade remanescente considerando solicitações de conexões já aprovadas ou em aberto da mesma forma que as conexões em operação.
- Por fim, destaca-se que a ferramenta está em contínuo desenvolvimento, com os trabalhos atuais focados na sua **expansão para redes de baixa tensão**, na **detecção de geração à revelia** e na inclusão do **cálculo automatizado de reforços de rede (MT e BT)**, baseado no critério de menor custo, para atender pedidos de conexão que excedam a capacidade de acomodação atual.
- Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento dessa ferramenta computacional, **espera-se ganhos significativos para a distribuidora, com a redução de homens-hora necessários para análise das solicitações de acesso, redução de custos com transgressões de tensão e redução de custos com perdas da rede**, porém também vislumbra-se **benefício aos consumidores com uma resposta mais rápida e consistente** da solicitação.

Realization:

instituto  
**abradee**



Host Company:

**CEMIG**



# Referências Bibliográficas

1. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021”. 2021a. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>
2. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021”. 2021b. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>
3. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Atendimento a pedidos de conexões MMGD - Mini e Microgeração distribuída - pós Lei 14300”. 2023a. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/atendimento-mmgd-mini-e-micro-geracao-distribuida>
4. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023”. 2023b. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>
5. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Unidades com Geração Distribuída”. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>
6. Knuth D. The Art of Computer Programming. Vol. 3, 2ª ed, 1998. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-201-89685-5.
7. Meira P. C. M.; Krishnamurthy D., DSS-Extensions. 2018. Disponível em: <https://dss-extensions.org>.



Realization:

instituto  
**abradee**



HostCompany:

**CEMIG**

# Agradecimentos



**Tiago R. Ricciardi**  
*Pesquisador*

*tiago.ricciardi@eraenergy.com.br*  
*http://www.eraenergy.com.br*  
*+ 55 (19) 3367-4118*



**Título:** Ferramenta Computacional Integrada para Cálculo Individualizado da Capacidade de Acomodação de Geradores Distribuídos no Sistema Elétrico de Distribuição  
**Tema:** Recursos Energéticos Distribuídos  
**Autores:** Jonathan A. Marcelo, José C. G. Andrade, Ricardo Torquato, Tiago M. Barbosa, Tiago R. Ricciardi, Fernanda C. L. Trindade, Walmir Freitas, Heliton O. Vilibor  
**Palavras-chave:** Geração-Distribuída - Sistemas de Distribuição de Energia - Fluxo de potência - Sobrecarga – Inversão de Fluxo de Potência - Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD) - Magnitude de Tensão

*Este trabalho é financiado com recursos do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no âmbito do projeto: **PA3091 - FERRAMENTA DE GESTÃO AUTOMÁTICA DA CAPACIDADE DE ACOMODAÇÃO (HOSTING CAPACITY) DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA***

Realization:

instituto  
**abradee**



HostCompany:

**CEMIG**





OBRIGADO!

