



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 12 112

Tópico: Aplicações de Novas Tecnologias

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: ESTUDO DE CASO EM UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Gilson Paulillo*

Flávio R. Garcia

Patricio R. Impinnisi

Mauricio P. Cantão

Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso envolvendo uma das principais tecnologias de GD disponíveis comercialmente, a Célula a Combustível, enfocando os aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica fornecida por tais dispositivos, em especial, harmônicos e desequilíbrios de tensão. Os trabalhos de medição e avaliação foram efetuados em uma célula a combustível, modelo PC-25C, potência de 200 kW, instalada nas dependências do LACTEC, em Curitiba-PR. Por fim, o trabalho apresentará as principais conclusões obtidas, indicando os principais aspectos de QEE, como uma primeira parte, a serem ponderados na aplicação deste tipo de dispositivo às atuais redes de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Célula Combustível – QEE – Harmônicos – Desequilíbrios – Geração Distribuída.

1.0 - INTRODUÇÃO

A geração distribuída – GD - constitui-se em um novo enfoque para a geração de energia elétrica. Diferentemente da geração centralizada, que responde pela grande maioria do fornecimento de energia no mundo, a GD caracteriza-se por não ser despachada por linhas de transmissão e ser de pequeno porte quando sua potência é comparada aos demais tipos de centrais de geração de energia elétrica. Alguns autores colocam a GD como uma fonte de energia

elétrica conectada diretamente à rede de distribuição no PAC do consumidor [1], [2]. Autores como Dondi [1], Laurie [3] e Standard & Poor's [4] colocam a GD, além da produção, como armazenagem de energia. Cogeração (também chamada de *Combined Heat and Power, CHP*) [3], [5] e também trigerção (além da energia elétrica e o calor, a refrigeração que pode ser obtida usando um absorvedor de calor) [6] são finalidades citadas pelos autores. A referência [6], por sua vez, define GD como "qualquer tecnologia de geração em pequena escala que fornece energia elétrica em um local próximo ao consumidor ou ao sistema de transmissão ou distribuição da concessionária" [7].

Dentre as diversas tecnologias de GD disponíveis atualmente podem ser citadas: células a combustível - CaC, microturbinas, volantes (*flywheels*), supercondutores e ultracapacitores. A tabela 1, a seguir, apresenta uma classificação das diferentes tecnologias de GD quanto ao tipo de combustível utilizado, tipo de conexão com a rede elétrica e faixas de potência.

Dois fatores têm contribuído para a introdução dessa nova tecnologia para fornecimento de energia elétrica. De um lado a reestruturação do setor de energia elétrica, que tem ocorrido em vários países do mundo, promovendo a desverticalização do setor, separando-o em geração, transmissão e distribuição, juntamente com a introdução dos mercados de energia elétrica.

* Centro Politécnico da UFPR – Caixa Postal 19067 - CEP 81531-990 - Curitiba - PR - BRASIL
Tel.: +55 (41) 361-6167 - FAX: +55 (41) 266-3582 - E-mail: gilsonp@lactec.org.br

Tabela 1 – Principais tecnologias de geração de energia elétrica para GD

Tecnologia	Fonte de combustível	Interface	< 100 kW	0,1 a 1 MW	> 1 MW
Pequenas turbinas a gás	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta Geração em CA			X
Motores recíprocos com geradores síncronos ou de indução	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta Geração em CA		X	X
Geotérmico	Renovável	Conexão direta Geração em CA		X	X
PCHs	Renovável	Conexão direta Geração em CA		X	X
Eólica	Renovável	Conexão direta – geração CA	X	X	X
Fotovoltaica	Renovável	Inversor – geração CC	X	X	X
Células a combustível	Renovável e não Renovável	Inversor – geração CC	X	X	X
Solar térmica	Renovável	Conexão direta – geração CA	X	X	X
Armazenamento em baterias	Rede elétrica	Inversor	X	X	X
Armazenamento em capacitores	Rede elétrica	Inversor	X	X	X
Armazenamentos em volantes	Rede elétrica	Conexão direta – geração CA		X	X
SMES ^(*)	Rede elétrica	Inversor		X	X
Microturbinas	Não renovável	Conexão direta – geração CA	X	X	

Dentre os possíveis efeitos decorrentes da reestruturação do setor elétrico e que contribuíram para a inserção da geração distribuída podem ser citados [8]:

- abertura do mercado de varejo, permitindo ao consumidor escolher entre diversos fornecedores de serviços e produtos, inclusive GD;
- taxaço baseada em critérios de desempenho, no qual a concessionária usaria a GD para otimizar a utilização dos bens;
- mecanismos mais sofisticados de mercado, que permitirão a composição de preços em tempo real e servirão de estímulo à GD.

Por outro lado, os avanços técnicos ocorridos na eletrônica de potência e microprocessadores

permitiram a interconexão de tais dispositivos à rede elétrica, com qualidade e eficiência, através da aplicação de inversores de frequência para este fim. Dessa forma, foram vencidas as barreiras técnicas e econômicas, uma vez que o custo dos inversores utilizados sofreu uma grande redução [9]. No contexto acima, insere-se este trabalho na medida

em que apresenta os resultados preliminares de um estudo da operação de uma CaC -, modelo PC 25C, potência igual a 200 kW, disponível nas instalações do LACTEC, em Curitiba-PR, sob o ponto de vista da QEE. De acordo com os diversos despachos de carga, serão avaliados diversos fenômenos de QEE, em especial harmônicos e desequilíbrios de tensão. Objetiva-se, dessa forma, analisar o comportamento desse dispositivo tanto como carga poluidora para o sistema, analisando-se o grau de sua contribuição, quanto como carga sensível para a QEE fornecida no PAC da instalação consumidora – neste caso, o barramento de entrada da SE LACTEC.

2.0 – CÉLULA A COMBUSTÍVEL - LACTEC

Um grande avanço na tecnologia de células a combustível foi atingido nos últimos anos, inclusive com participação de alguns grupos de pesquisa do Brasil. Ainda assim, esta área de aplicação tecnológica encontra-se incipiente, com vários temas de pesquisa a serem desenvolvidos: novos materiais e desenhos, diminuição de custos de produção das células, reforma de combustíveis e outros meios de produção de hidrogênio, novas aplicações de células a combustível, etc.

De todos os tipos de CaC existentes, a de ácido fosfórico (PAFC) é a única que se encontra em escala comercial, com mais de 220 unidades instaladas no mundo [10]. As células de eletrólito polimérico (PEMFC) e de óxido sólido (SOFC) são as mais promissoras, sendo que unidades veiculares e estacionárias de PEMFC se encontram na fase de testes para aplicações comerciais.

A CaC disponível no LACTEC foi produzida pela International Fuel Cell, empresa que produz células a combustível em caráter comercial (as 220 unidades mencionadas anteriormente). Esta célula é alimentada a gás natural, reformado numa primeira etapa para fornecer hidrogênio, com o qual produzem 200 kW de energia elétrica em corrente alternada. Esta CaC tem três modos de operação: *grid connected*, *grid independent* e *idle*. No primeiro caso, opera em paralelo com a concessionária, podendo se aplicada para, por exemplo, diminuir o consumo de energia de uma dada instalação no horário de ponta. No segundo caso, sua operação se dá de forma independente da rede de distribuição, alimentando um conjunto

de cargas definidas, a critério do consumidor, como prioritárias. O último modo é o de espera, onde a CaC fica pronta para gerar energia. A figura 1 apresenta a CaC instalada no



LACTEC.

Figura 1 – CaC disponível no LACTEC.

Vale salientar que, apesar desta tecnologia estar disponível comercialmente, o desempenho das células a combustível na sua aplicação concreta ainda é área de estudo intenso. Questões como a durabilidade das células, modos de interligação com a rede, influência do combustível (injeção de hidrogênio substituindo o gás natural), níveis de confiabilidade, configuração da rede elétrica, disponibilidade de gás, demanda por energia confiável, impacto no meio ambiente e no mercado de energia e qualidade da energia (objeto do presente trabalho), entre outras, são levantadas durante a avaliação da tecnologia para aplicação em geração distribuída de energia.

3.0 – ESTUDO DE CASO – CaC LACTEC:

A figura 2, no anexo 1, apresenta o diagrama unifilar da instalação da CaC PC-25C no LACTEC. A partir dessa instalação foram conduzidas medições, utilizando-se o equipamento ACE 2000 a fim de se verificar a operação da célula quanto à QEE, mais especificamente, harmônicos e desequilíbrios de tensão.

Foram definidos diversos patamares de potência – 10, 20, 50, 100, 150 e 200 kW -, com períodos de monitorização de 24 horas para cada patamar. Este procedimento teve por objetivo verificar as injeções harmônicas da CaC, bem como o seu impacto no ponto de instalação.

Foram realizados dois tipos de medição:

- 1ª – Medição de Harmônicos e Energia com a Célula de Combustível fora de operação;
- 2ª – Medição de Harmônicos e Energia com a Célula Combustível em operação.

Os resultados obtidos nas medições efetuadas, conforme o procedimento acima são apresentados no item 4.0.

4.0 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES HARMÔNICAS E ENERGIA REALIZADAS EM CAMPO:

4.1 – Com a Célula de Combustível Fora de Operação (figuras de 3 a 7):

a) Tensões:

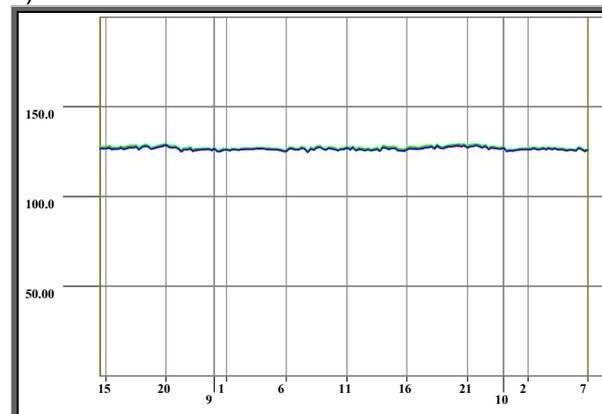


Figura 3 – Tensões no barramento.

b) Correntes:

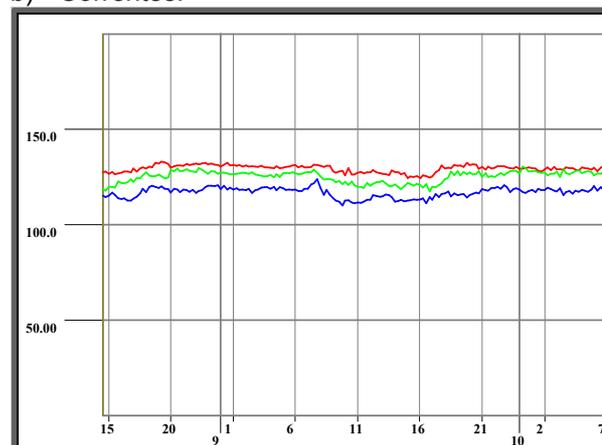


Figura 4 – Correntes no 2º do secundário do transformador.

c) Distorção Harmônica de Tensão (DHV):

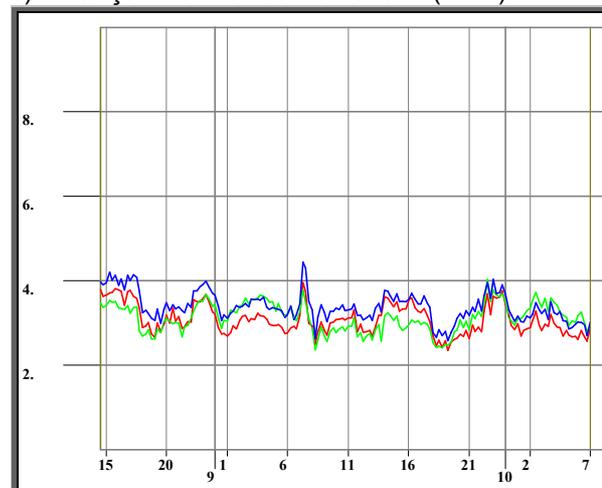


Figura 5 – DHV (%).

g) Distorção Harmônica de Corrente (DHI):

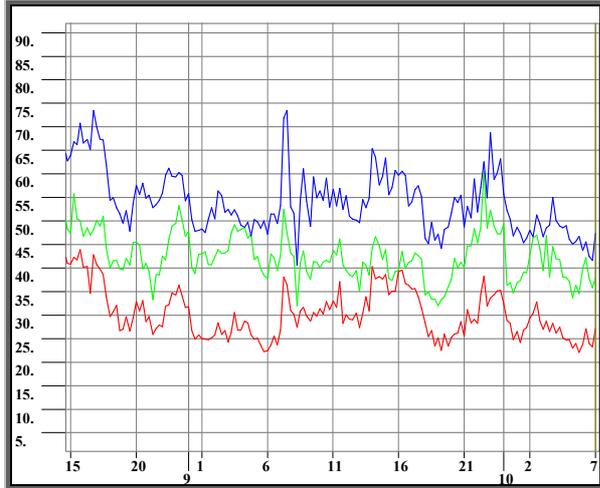


Figura 6 – DHI (%).

b) Correntes:

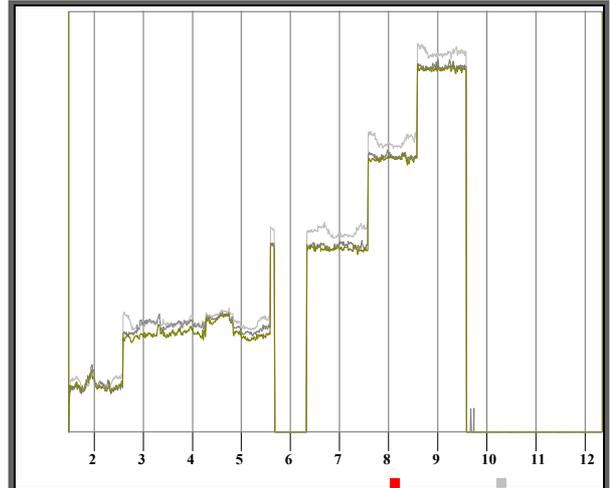


Figura 9 – Correntes no 2ario do Trafo.

h) Fator de Potência:

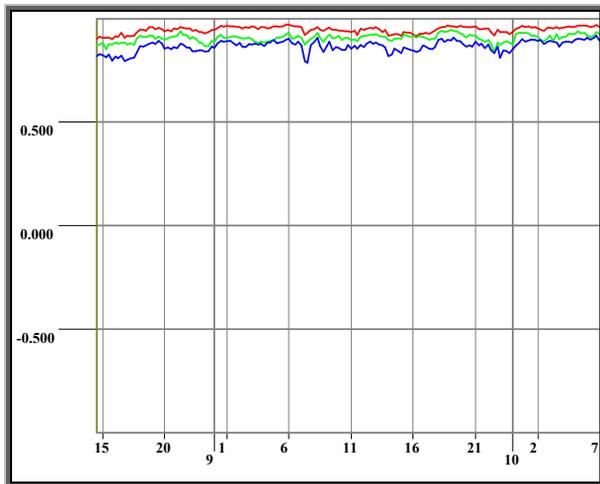


Figura 7 – Fator de Potência (%).

c) Distorção Harmônica de Tensão (DHV):

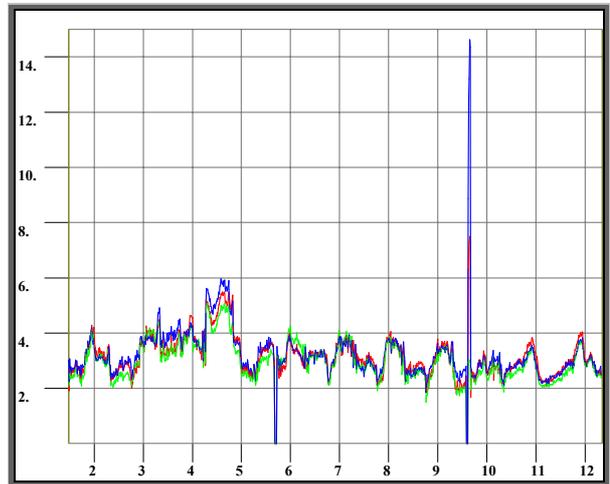


Figura 10 – DHV (%).

4.2 – Com a Célula de Combustível em Operação (figuras de 8 a 14):

a) Tensões:

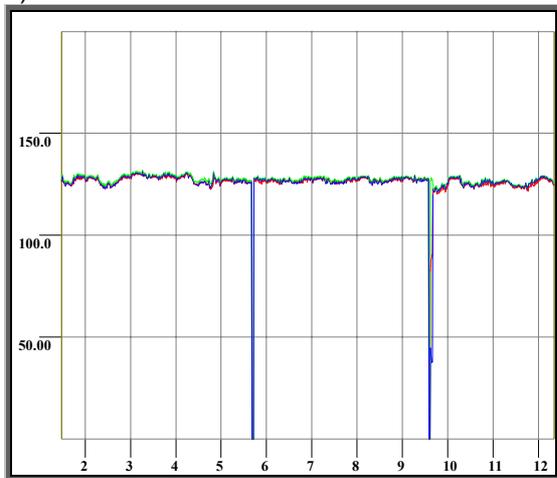


Figura 8 – Tensões no Barramento.

d) Distorção Harmônica de Corrente (DHI):

→ Célula a 10%:

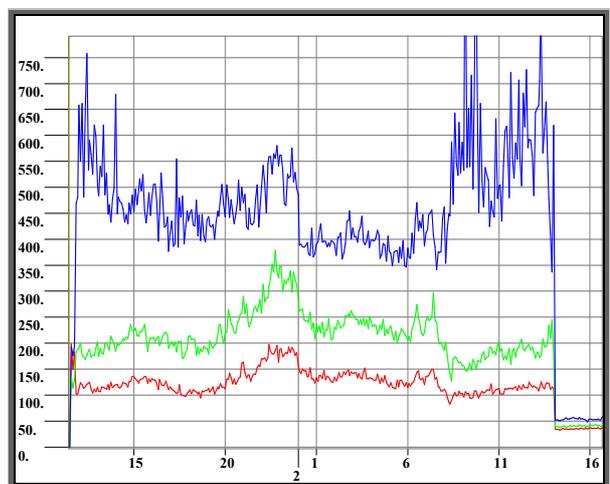


Figura 11 – DHI (%).

→ Célula a 50%:

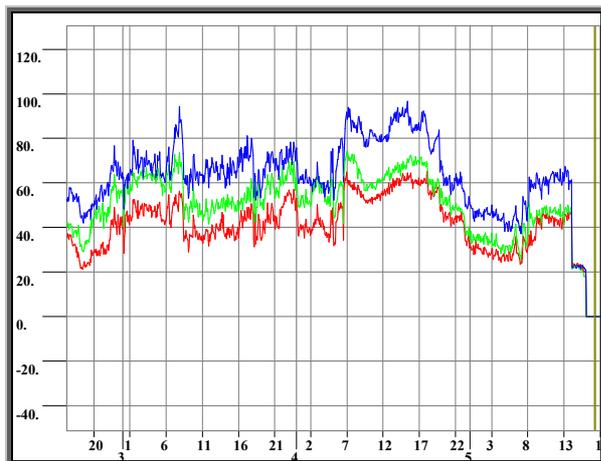


Figura 12 – DHI (%).

→ Célula a 100%:

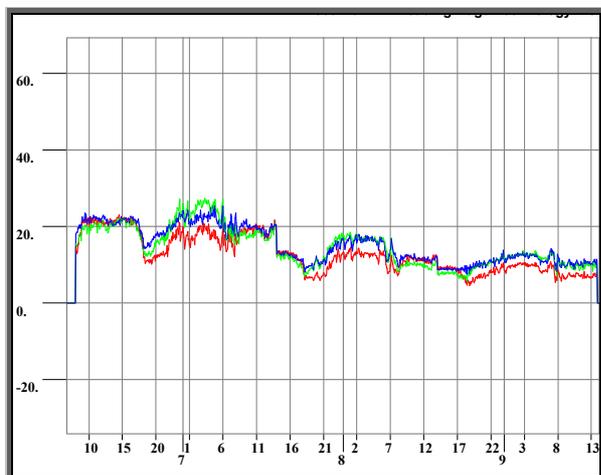


Figura 13 – DHI (%).

e) Fator de Potência:

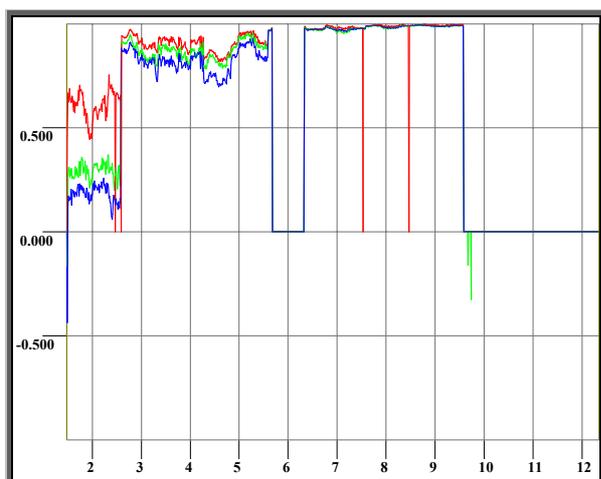


Figura 14 – Fator de Potência (%).

5.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ENERGIA REALIZADAS EM CAMPO

Foram realizadas medições no secundário do transformador, em 127 V, fase-neutro, para duas situações: com a CaC fora de operação e com a CaC em operação nos diversos patamares de geração – entre 10 e 100 %. Das medições e análises realizadas sob o ponto de vista de geração harmônica, por parte da CaC, podem ser obtidas os seguintes resultados.

5.1 – Com a célula combustível fora de operação:

- tensões rms - estáveis e equilibradas;
- correntes e potências ativas - levemente desequilibradas;
- distorção harmônica total de tensão (DHTv) - variou entre 1,9 e 4,2 %, para as três fases;
- distorção harmônica total de corrente - variou bastante entre as fases - 23 % para a fase menos distorcida e 74% para a fase mais distorcida;
- fator de potência - variou entre 0,8 e 0,95.

5.2 – Com a Célula Combustível em operação:

- tensões rms - estáveis e equilibradas;
- correntes e potências ativas - mostraram-se mais equilibradas para todas as condições de geração analisadas (10, 50 e 100 %);
- distorção harmônica total de tensão (DHTv) - variou entre 1,9 e 6,0 % para as três fases. O DHTv igual a 6% ocorreu no momento em que a célula estava gerando 10 % da potência nominal da mesma;
- distorção harmônica total de corrente - variou bastante para cada uma das condições de operação da célula: para 10 % o DHTi variou entre 100 e 750 % da corrente nominal; para 50 % o DHTi variou entre 20 e 100 % da corrente nominal; para 100 % o DHTi variou entre 10 % e 25 % da corrente nominal;
- fator de potência também variou para cada uma das condições operativa da célula: para 10% o FP variou entre 0,2 e 0,7 da corrente nominal; para 50% o FP variou entre 0,7% e 0,95 da corrente nominal; para 100% o FP ficou muito próximo a 1,0.

6.0 – CONCLUSÕES

Para todas as condições de operação analisadas, a entrada em operação da célula combustível pouco afeta os níveis de distorção harmônica total de tensão, ficando dentro dos valores recomendados por norma.

Apesar do alto conteúdo harmônico em corrente injetado na instalação, o mesmo não se mostrou capaz de distorcer significativamente a tensão.

Vale ressaltar que esta análise é válida apenas para este caso, sendo que para sistemas elétricos mais fracos, ou seja com menor nível de curto-circuito, tal condição venha a se tornar relevante.

Por fim, o trabalho apresentou os resultados preliminares de uma investigação que ainda se encontra em seu início. Neste caso, face a indisponibilidade de somente um único equipamento de monitorização, os resultados não são totalmente conclusivos. Neste sentido, os autores recomendam que, para a obtenção de melhores resultados através de medições em campo, o procedimento seja repetido, utilizando-se, no mínimo e simultaneamente, 2 equipamentos de medição de harmônicos, conectando-se um no ramal da célula combustível e o outro no secundário do transformador alimentador. Pode ser interessante também instalar um terceiro equipamento junto às demais cargas, visando avaliar a contribuição harmônica das mesmas no sistema em estudo. Por fim, devem ainda ser analisadas as condições de operação da CaC nos demais modos de operação, o que não foi possível neste estudo face às características particulares da instalação analisada.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dondi, P. et al, "Network integration of distributed power generation", Journal of Power Sources 106 (2002) 1-9 [GD All sci-00-02-03-78];
- [2] Greene N. Hammerschlag, R., "Small and Clean is Beautiful: Exploring Small and Clean Is Beautiful; Exploring the Emissions of Distributed Generation and Pollution Prevention Policies", The Electricity Journal, Volume 13, N 5, June 2000, Páginas 50-60;
- [3] Laurie, R. A., "Distributed generation: reaching the market just in time", The Electricity Journal Elsevier Science Inc. 1040-6190. 2001 [Artigo 1. pdf];
- [4] Standard & Poor's Utilities & Perspectives Newsletter Special Technology Issue – January 3rd, 2000;
- [5] Strachan, N. Dowlatabadi H., "Distributed generation and distribution utilities", Energy Policy 30 (2002) 649-661 [GD All sci-00-02-03-78] [GD-Energy – 98-02 04-164.pdf];
- [6] DPCA The Distributed Power Coalition of America, 2002 Referência disponível na internet 16/09/2002 as 09h42min. <http://www.distributed-generation.com/dpca/what.html>;
- [7] Turkson J, Wohlgemuth, N., "Power sector reform and distributed generation in sub-Saharan Africa", Energy Policy 29 (2001) 135-145. [007 de 246 pdf];
- [8] Distributed Generation: Understanding the Economics. Whitepaper by Arthur D. Little, Inc. 1999;
- [9] Camargo, J. C., "A alternativa da geração distribuída de energia elétrica", Anais do Congresso Brasileiro de Energia, 2002, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2002. v. 4, p. 1748-1753;
- [10] Joseph M. King, Michael J. O'Day, "Applying fuel cell experience to sustainable power products", Journal of Power Sources 86 (2000) 16-22.

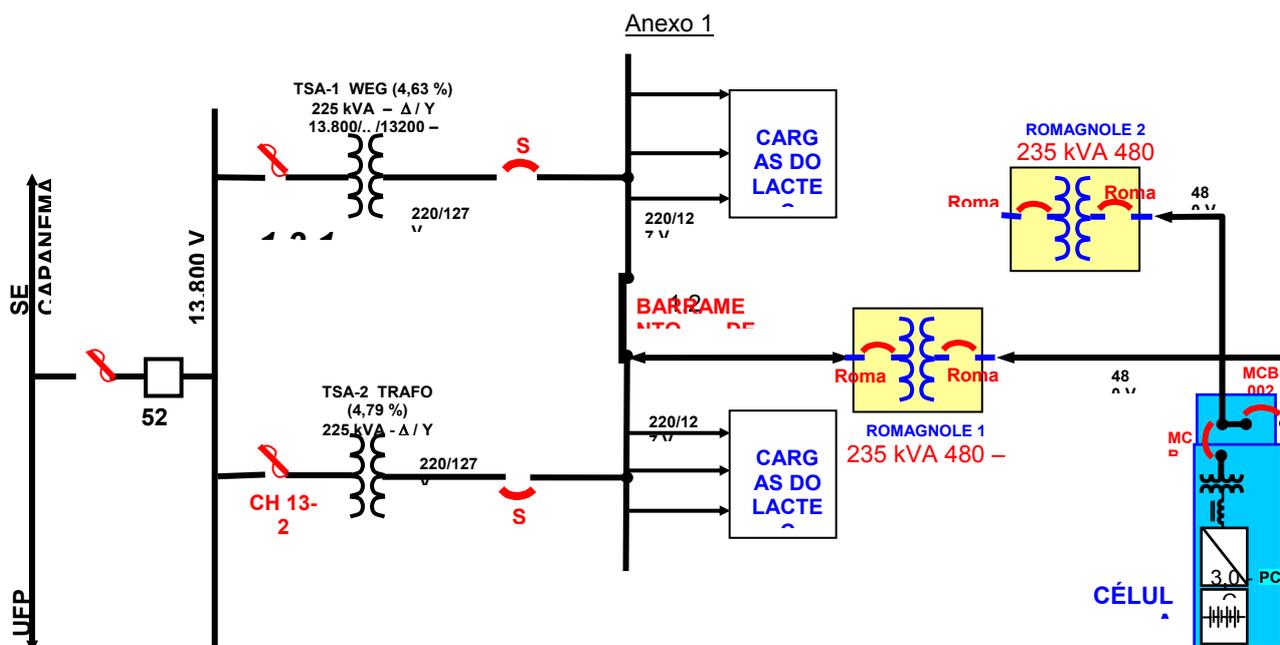


Figura 2 – Diagrama unifilar da instalação da CaC no LACTEC.