

Estabilidade Transitória em uma Geração Distribuída – Estudo de Caso Real

Henrique Fantoni Primo*. João Inácio Coelho**
Rafael Tenágli Mariani***

**Electrical Studies Department Manager – SM&A, Master in Electrical Engineering - UFMG
Brasil (Tel: 055 31 99791-1821; e-mail: henrique.fantoni@sma-eng.com.br).*

** *Electrical Studies Department Engineer – SM&A (e-mail:
joao.coelho@sma-eng.com.br)*

*** *Electrical Studies Department Engineer – SM&A, (e-mail: rafael.mariani@sma-eng.com.br)*

Abstract: With the expansion of industrial plants, process interruptions are becoming increasingly costly for companies to seek alternative ways to ensure the continuity of electricity supply across distributed generations. This article presents an analysis of an electrical power interruption problem in a real steel industry, which has a thermal cogeneration plant operating in parallel with the local concessionaire. After the occurrence of electrical disturbances in the distribution system of the concessionaire, the plant entrance protections act in order to isolate the plant with the substations considered critical for the process. However, at this time, the generator's internal protections act by shutting down the plant and consequently interrupting the plant's power supply. After the implementation of the load rejection system, defined through a stability study, it can be proved in practice the effectiveness of the adopted solution. This proof is presented through an oscillography, generated by a protection relay, of a real event of loss of the concessionaire. The simulations of the cases analyzed in the stability study were performed using SKM Power Tools for Windows (PTW) software.

Resumo: Com a ampliação das plantas industriais, as interrupções no processo se tornam cada vez mais onerosas para as empresas, fazendo com que estas busquem formas alternativas de garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica através de gerações distribuídas. Este artigo apresenta uma análise de um problema de interrupção da energia elétrica em uma indústria siderúrgica real, que possui uma usina térmica de cogeração operando em paralelo com a concessionária local. Após a ocorrência de distúrbios elétricos no sistema de distribuição da concessionária, as proteções da entrada da planta atuam de forma a isolar a usina com as subestações consideradas críticas para o processo. Entretanto, nesse momento, as proteções internas do gerador atuam desligando a usina e consequentemente interrompendo a alimentação da planta. Após a implementação do sistema de rejeição de cargas, definido através de um estudo de estabilidade, pode-se comprovar na prática a eficácia da solução adotada. Essa comprovação é apresentada através de uma oscilografia, gerada por um relé de proteção, de um evento real de perda da concessionária. As simulações dos casos analisados no estudo de estabilidade, foram realizadas no software SKM Power Tools for Windows (PTW).

Keywords: Transient Stability, Islanding, Load Rejection, Distributed Generation, Cogeneration Thermal Power Plant.

Palavras-chaves: Estabilidade transitória, Ilhamento, Rejeição de cargas, Geração Distribuída, Usina térmica de cogeração.

1. INTRODUÇÃO

Com a ampliação das plantas industriais, as interrupções no processo se tornam cada vez mais onerosas para as empresas, fazendo com que estas busquem formas alternativas de garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica através da utilização de Geração Distribuída (GD), expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia. De acordo com o INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética, podem ser considerados como Geração Distribuída (INEE 2018):

- Co-geradores (indústrias em geral);
- Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's.

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL 2018). Segundo a Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABDG 2018), atualmente, a potência total instalada referente as Usinas de Geração Distribuídas no Brasil está em torno de 15,8 GW.

A indústria siderúrgica real, analisada neste trabalho, utiliza os gases liberados dentro dos Altos Fornos para a produção de energia elétrica, através de uma usina térmica de cogeração (UTE), que opera em paralelo com rede de distribuição da concessionária local, alimentando a barra 1, na qual estão conectadas as subestações consideradas críticas para o processo produtivo, conforme Figura 1.

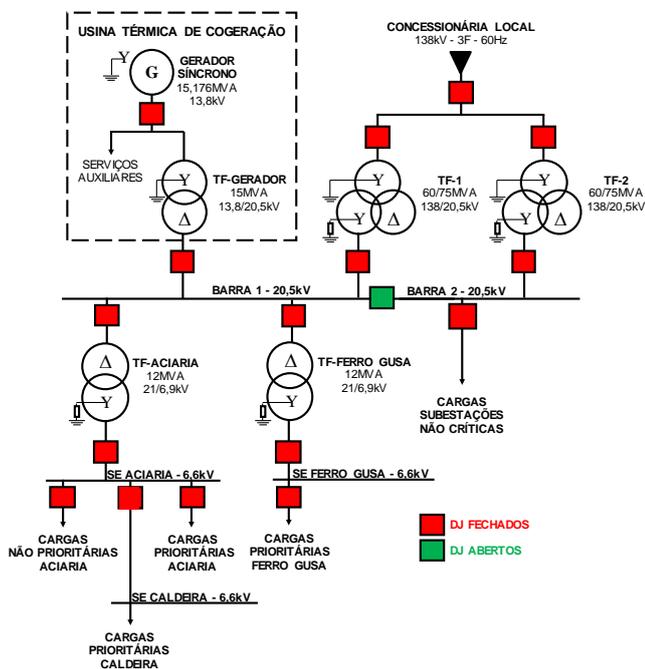


Fig. 1 Diagrama Unifilar Simplificado.

Após a ocorrência de distúrbios elétricos no sistema de distribuição da concessionária, as proteções da entrada da planta atuam de forma a ilhar a usina com as subestações consideradas críticas para o processo, abrindo o disjuntor da entrada da planta. O problema observado, neste caso, é que as proteções internas do gerador síncrono atuam, no mesmo instante, abrindo o respectivo disjuntor desligando a UTE e consequentemente interrompendo a alimentação total da planta.

De forma a solucionar o problema citado, este trabalho apresenta o estudo de estabilidade transitória do sistema elétrico, considerando os dados apresentados nos documentos do gerador síncrono, os ajustes dos dispositivos de proteção e as informações do sistema elétrico levantadas em campo. Observou-se neste estudo que os distúrbios elétricos de perda da concessionária geram instabilidade no gerador, o que confirma a atuação do seu respectivo relé, conforme relatado anteriormente. Esta instabilidade se deve ao fato de que a

potência demandada pelas subestações críticas está em torno de 15 MW, sendo 25% superior a potência fornecida pelo gerador. Como solução para o problema citado, foi adotado e implementado um sistema de rejeição das cargas não prioritárias das subestações críticas, totalizando uma potência a ser descartada em torno 4MW, utilizando a atuação da função de proteção de variação da frequência pelo tempo (df/dt) (Júnior 2006). O sistema de rejeição das cargas contemplou, além da habilitação da função df/dt , a instalação de relés ultra rápidos e os cabos de interligação entre os equipamentos (relé df/dt , relés finder e disjuntores). As simulações dos casos analisados no estudo de estabilidade, foram realizadas com a utilização do software SKM Power Tools for Windows (PTW).

Conforme reportado pela equipe técnica da planta, após a implementação da solução definida, ocorreu um evento de perda da concessionária, seguido de ilhamento e rejeição das cargas não prioritárias, mantendo a estabilidade do sistema. Este artigo apresenta a oscilografia, gerada pelo relé de proteção, do evento ocorrido.

2. MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO

Inicialmente, foi realizado um levantamento de dados em campo de forma a se obter as informações necessárias para a elaboração do estudo de estabilidade transitória. A seguir é apresentada a descrição de como foi realizado o modelamento dos principais equipamentos e componentes do sistema elétrico analisado.

2.1 Fonte de Alimentação via Rede de Distribuição da Concessionária Local de Energia

A fonte de alimentação via rede de distribuição foi modelada a partir dos valores de curto-circuito, fornecidos pela concessionária local de energia no ponto de conexão em 20,5 kV:

- Curto-circuito trifásico: 9.158 A, X/R: 7,58;
- Curto-circuito monofásico: 9.080 A, X/R: 7,56.

2.2 Cargas e respectivas Demandas

Na Tabela 1, são apresentadas as cargas divididas de acordo com prioridade e a criticidade das suas subestações.

Tabela 1. Cargas e respectivas demandas.

| Subestação | | Descrição | Demanda (kW) |
|---------------|-------------|---------------------------------|--------------|
| Tag | Condição | | |
| SE Aciaria | Crítica | Cargas Prioritárias Aciaria | 1.777,63 |
| | | Cargas Não Prioritárias Aciaria | 3.954,38 |
| SE Caldeiras | Crítica | Cargas Prioritárias Caldeiras | 2.200,00 |
| SE Ferro Gusa | Crítica | Cargas Prioritárias Ferro Gusa | 7.078,00 |
| - | Não Crítica | Cargas Subestações Não Críticas | 40.263,00 |

2.3 Gerador Síncrono

O gerador síncrono foi modelado considerando as informações obtidas nas folhas de dados e demais documentos fornecidos pelo fabricante.

Dados Básicos de Placa

Na Tabela 2 são apresentados os dados básicos de placa do gerador síncrono.

Tabela 2. Dados básicos de placa do gerador síncrono.

| Dado | Descrição | Valor | Unidade |
|------|---------------------------|--------|---------|
| S | Potência Nominal Aparente | 15,176 | MVA |
| V | Tensão Nominal | 13,8 | kV |
| fp | Fator de Potência | 0,85 | Ind. |
| f | Frequência Nominal | 60 | Hz |

Modelo Matemático do Gerador Síncrono

Na Figura 2 é apresentado, na forma de blocos, o modelo matemático do gerador síncrono fornecido pelo fabricante TOSHIBA.

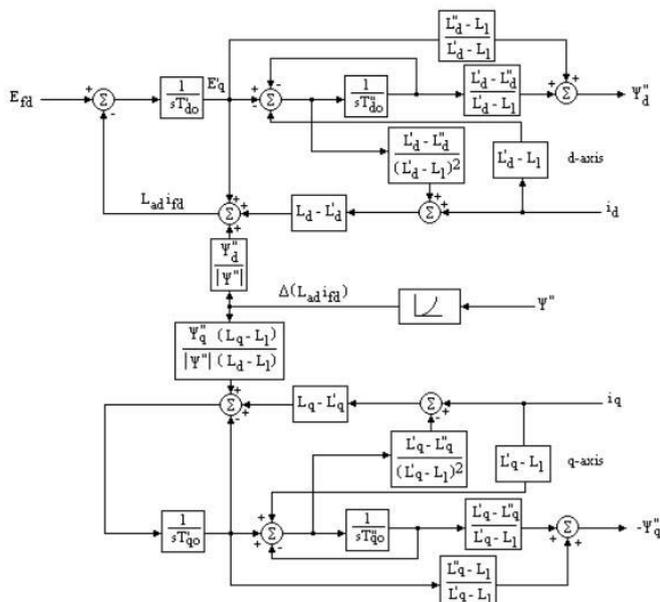


Fig. 2 Modelo Matemático do Gerador Síncrono.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros utilizados no modelamento do gerador síncrono.

Tabela 3. Dados do gerador síncrono.

| Dado | Descrição | Valor | Unidade |
|------|---|-------|---------|
| Ra | Resistência de Armadura | 0,003 | pu |
| Xd | Reatância de eixo direto | 2,20 | pu |
| Xq | Reatância de eixo em quadratura | 1,10 | pu |
| X'd | Reatância transitória de eixo direto | 0,38 | pu |
| X'q | Reatância transitória de eixo em quadratura | 0,40 | pu |
| X'' | Reatância subtransitória de eixo direto | 0,20 | pu |
| Xl | Reatância de dispersão | 0,16 | pu |
| H | Constante de Inércia (gerador+turbina+reductor) | 2,07 | S |

| Dado | Descrição | Valor | Unidade |
|-------|--|-------|---------|
| D | Coefficiente de Amortecimento em carga | 2,5 | % |
| T'do | Constante Transitória de circuito aberto em eixo-d | 7,5 | S |
| T''do | Constante Subtransitória de circ. aberto em eixo-d | 0,076 | S |
| T'qo | Constante Transitória de circuito aberto em eixo-q | 1,0 | S |
| T''qo | Constante Subtransitória de circ. aberto em eixo-q | 0,076 | S |
| S1,0 | Fator de Saturação a 1,0 pu | 0,1 | - |
| S1,2 | Fator de Saturação a 1,2 pu | 0,5 | - |

Modelo Matemático do Regulador de Tensão

Na Figura 3 é apresentado, na forma de blocos, o modelo matemático do regulador de tensão REIVAX, padrão IEEE para reguladores de tensão AC com excitação brushless.

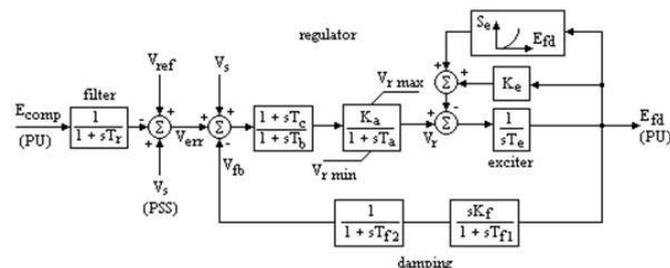


Fig. 3 – Modelo Matemático de Regulador de Tensão.

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros utilizados no modelamento do regulador de tensão.

Tabela 4. Parâmetros do regulador de tensão.

| Dado | Descrição | Valor | Unidade |
|----------|---|-------|---------|
| Tr | Constante de tempo do filtro | 0,04 | S |
| Ka | Ganho em regime permanente | 50 | Pu |
| Ta | Constante de tempo do regulador de tensão | 0,06 | S |
| Tc/Tb | Relação do filtro lead-lag | 0,00 | - |
| Tb | Constante de tempo do filtro lead-lag | 0,00 | S |
| Vrmax | Saída máxima do regulador de tensão | 1,0 | Pu |
| Vrmin | Saída mínima do regulador de tensão | -0,9 | Pu |
| KE | Ganho da excitatriz | -0,05 | Pu |
| TE | Constante de tempo da excitatriz | 0,5 | S |
| Kf | Ganho do controlador de realimentação | 0,05 | Pu |
| Tf1 | Constante de tempo da realimentação | 0,078 | S |
| Tf2 | Constante de tempo da realimentação | 0,80 | S |
| E1 | Tensão no fator de saturação mínima | 1,0 | Pu |
| Se(E1) | Fator saturação mínima | 0,074 | - |
| E2=Efmáx | Tensão no fator de saturação máximo | 4,60 | Pu |
| Se(E2) | Fator saturação máximo | 0,267 | - |

Modelo Matemático do Regulador de Velocidade

O regulador de velocidade do gerador síncrono é do tipo mecânico-hidráulico. Neste estudo foi utilizado o modelo de regulador de velocidade para turbinas a vapor (turbogeradores), modelo 505E do fabricante Woodward.

Na Figura 4 é apresentado, na forma de blocos, o modelo matemático do regulador de velocidade.

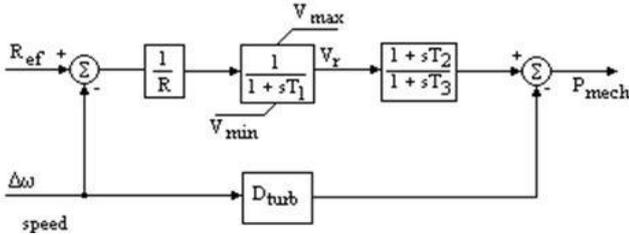


Fig. 4 Modelo Matemático de Regulador de Velocidade.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros utilizados no modelamento do regulador de velocidade.

Tabela 5. Parâmetros do regulador de velocidade.

| Dado | Descrição | Valor | Unidade |
|-------|--|--------|---------|
| R | Droop permanente | 0,050 | - |
| T1 | Constante de tempo do governador | 0,36 | S |
| Vmax | Máxima potência de saída (base gerador) | 0,85 | Pu |
| Vmin | Mínima potência de saída | -0,050 | Pu |
| T2/T3 | Relação da Alta-Pressão da Turbina | 0,0 | - |
| T3 | Constante do vapor | 0,16 | S |
| Dturb | Coefficiente de Amortecimento da Turbina | 0,1 | - |

Obs.: O valor Vmin = -0,05 representa a compensação das perdas na turbina e acessórios no limite do governador.

2.4 Sistema de Proteção

Na Tabela 6 são apresentados os ajustes das funções, analisadas neste trabalho, dos dispositivos de proteção.

Tabela 6. Ajustes das funções, analisadas neste trabalho, dos dispositivos de proteção.

| Circuito | Descrição Da Função | Ajuste |
|----------------------------------|---|-------------------------|
| Gerador | Subtensão (ANSI 27) | 70% com 5s |
| | Sobretensão (ANSI 59) | 117% com 5s |
| | Subfrequência (ANSI 81<) | 57Hz com 0,5s |
| | Sobrefrequência (ANSI 81>) | 63Hz com 3s |
| Entrada via Concessionária Local | Variação da frequência no tempo (df/dt) | 8Hz/s com 0,1s@f<59Hz |
| | | 3,5Hz/s com 0,2s@f<59Hz |

3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A seguir são apresentados os resultados de dois casos simulados, com a utilização do software SKM Power Tools for Windows (PTW), no estudo de estabilidade do sistema elétrico da indústria siderúrgica analisada neste trabalho.

3.1 Caso 1 – Perda da Concessionária Local de Energia

Descrição Caso 1: Gerador síncrono da UTE operando em paralelo com a concessionária local, alimentando a barra 1 de 20,5 kV, foi simulado o desligamento da concessionária. Na Tabela 7 é apresentada a sequência de eventos.

Tabela 7. Sequência de eventos do Caso 1 simulado.

| Sequência de Eventos | Função de Proteção | Tempo Total de Atuação da Proteção | Consequência |
|------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 1 Perda Concessionária | - | - | Perda de estabilidade |

Resultados:

- Variações de Tensão na Barra 1

Na Figura 5, pode-se observar que a tensão na barra 1 decaiu de 1 pu para 0,18 pu após 0,2 s do desligamento da concessionária local, sendo praticamente nula em 5 s.

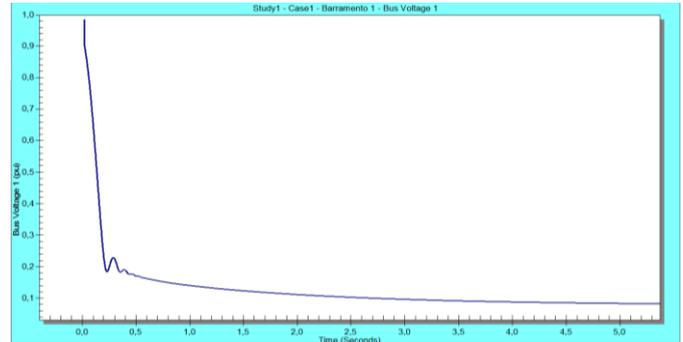


Fig. 5 – Tensão na Barra 1.

- Variação de Frequência na Barra 1

Na Figura 6, pode-se observar que a frequência na barra 1 oscilou até aproximadamente 0,4 s após o desligamento da concessionária local. Depois aumentou até próximo de 64 Hz em 1 s. Esta curva demonstra que o gerador tentou assumir uma carga cuja demanda era maior do que a sua capacidade nominal, uma vez que ocorreu a perda da concessionária.

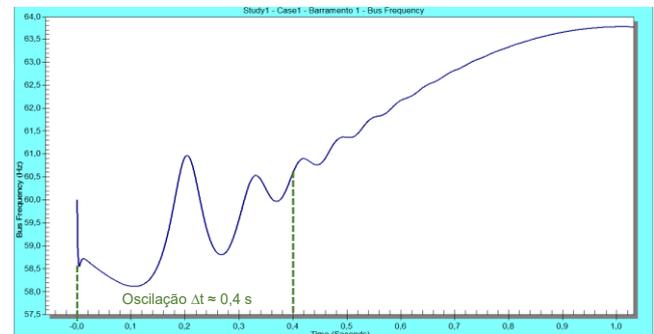


Fig. 6 – Frequência na Barra 1.

- Potências Ativa e Reativa nos terminais do Gerador Síncrono

Na Figura 7, pode-se observar que a potência ativa nos terminais do gerador síncrono chegou a 2,25% (25,4 MW) da sua capacidade nominal (11,3 MW). Na sequência o gerador síncrono entra em colapso e sua potência ativa zera rapidamente (antes de 5s).

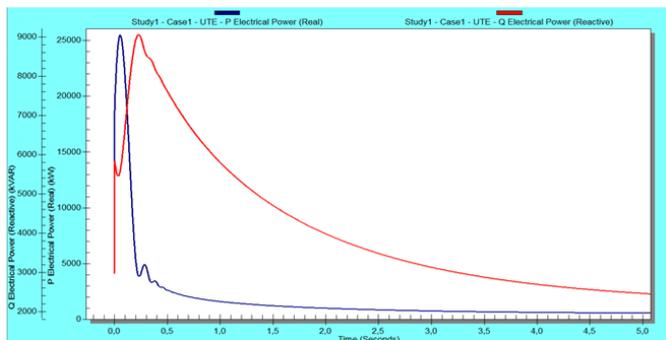


Fig. 7 – Potências Ativa e Reativa no Gerador Síncrono.

3.1 Caso 2 – Perda da Concessionária Local de Energia, seguido de Ilhamento UTE e Rejeição de Cargas SE Aciaria

Descrição Caso 2: Gerador síncrono da UTE operando em paralelo com a concessionária local, alimentando a barra 1 de 20,5 kV, foi simulado o desligamento da concessionária e na sequência a atuação da proteção realizando o ilhamento e a rejeição de cargas. Na Tabela 8 é apresentada a sequência de eventos.

Tabela 8. Sequência de eventos do Caso 2 simulado.

| Sequência de Eventos | Função de Proteção | Tempo Total de Atuação da Proteção | Consequência |
|--|--------------------|--|--|
| 1 Perda Concessionária | - | - | - |
| 2 Abertura dos disjuntores 2 e 3 | df/dt | 0,1s após a perda da concessionária | Ilhamento da Barra 1 |
| 3 Abertura dos disjuntores das cargas não prioritárias na SE Aciaria | df/dt | 0,35s após o novo decaimento da frequência | Rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria |

Resultados:

- Variações de Tensão na Barra 1

Na Figura 8, pode-se observar que a tensão na barra 1 decaiu para menos de 0,65 pu em um tempo de 0,1 s após o desligamento da concessionária local. Neste momento, o primeiro nível da função df/dt atua desligando os disjuntores, promovendo o ilhamento da UTE com as subestações críticas. Como a demanda das cargas das subestações críticas é superior a potência do gerador síncrono, a tensão da barra 1 tende a decair novamente de forma brusca, porém, 0,35 s após este novo decaimento, o segundo nível da função df/dt atua promovendo a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria, através do desligamento de seus respectivos disjuntores. Na sequência, a tensão vai se reestabelecendo até chegar a 1 pu em aproximadamente 10 s. Destacou-se na

Figura 8, uma curva pontilhada em vermelho, representando a tendência da curva de tensão, caso a rejeição das cargas não tivesse ocorrido e o sistema tivesse perdido a estabilidade.

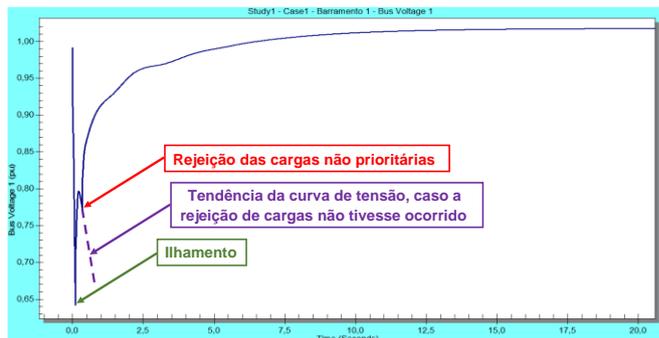


Fig. 8 – Tensão na Barra 1.

- Variações de Frequência na Barra 1

Na Figura 9, pode-se observar que a taxa de variação da frequência do instante do desligamento da concessionária até o momento do ilhamento, foi de 12,6 Hz/s, evidenciando a atuação do primeiro nível da função df/dt. Após o ilhamento, a taxa de variação da frequência foi em torno de 4,6 Hz/s, promovendo a rejeição das cargas não prioritárias, através da atuação do segundo nível da função df/dt. Na sequência, a frequência oscilou até restabelecer em aproximadamente 6 s, caracterizando a estabilidade do sistema.



Fig. 9 – Frequência na Barra 1.

- Potências Ativa e Reativa nos terminais do Gerador Síncrono

Na Figura 10, pode-se observar que após 0,5 s a potência ativa nos terminais do gerador síncrono chegou próxima de sua capacidade nominal (11,3 MW).

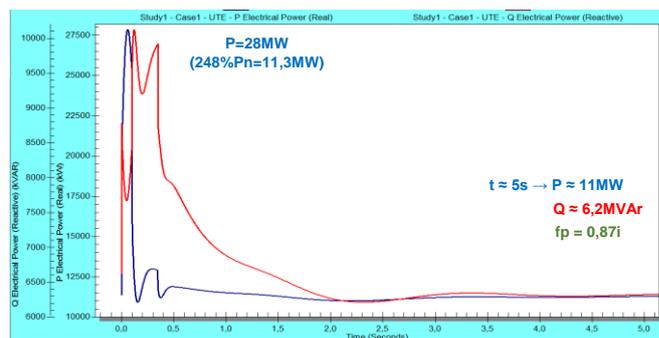


Fig. 10 – Potências Ativa e Reativa no Gerador Síncrono.

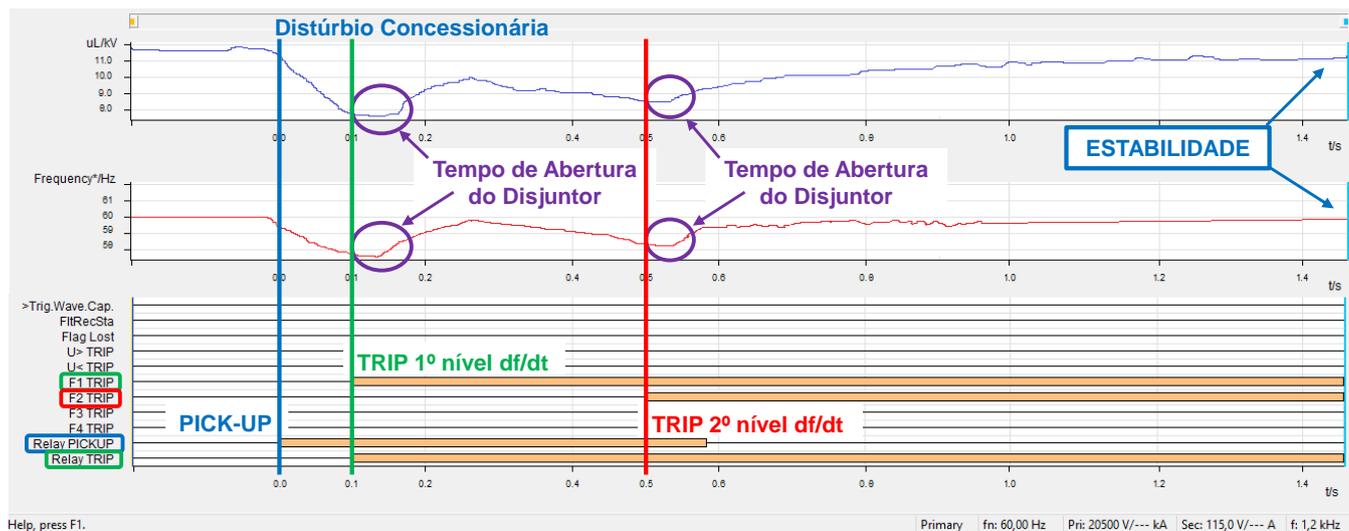


Fig. 11 – Oscilografia, gerada no relé de proteção, de um evento real de perda de concessionária, seguido de ilhamento e rejeição de cargas.

4. OSILOGRAFIA DE UM EVENTO REAL DE PERDA DA CONCESSIONÁRIA

Foi reportado pela equipe técnica da planta que, após a implementação da solução apresentada neste trabalho, ocorreu um evento real de perda da concessionária. Entretanto, desta vez a função df/dt do relé de proteção atuou corretamente em um 1º nível, ilhando a UTE e as subestações críticas, e posteriormente em um 2º nível, realizando a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria. Desta forma, o gerador conseguiu se manter em sincronismo, garantindo a estabilidade transitória do sistema.

Na Figura 11, são apresentadas as curvas de tensão e frequência, bem como os status das atuações das funções de proteção, obtidas da oscilografia gerada pelo relé. Pode-se observar que o 1º nível da função df/dt (F1 TRIP), atuou ilhando a UTE em aproximadamente 0,1 s após o evento, conforme ajustes apresentados na Tabela 6. Na sequência, a UTE tenta alimentar as subestações críticas, porém, pelo fato da demanda destas subestações serem superiores a potência do gerador síncrono, a frequência sofre uma nova variação brusca (em torno de 4,6Hz/s), porém com uma taxa de decaimento menor em relação a variação anterior (em torno de 12,6Hz/s). Neste momento, o 2º nível da função df/dt (F2 TRIP), atuou rejeitando as cargas não prioritárias na SE Aciaria, em aproximadamente 0,25 s. Após a atuação deste 2º nível da função df/dt , a tensão e frequência se normalizaram gradativamente.

5. CONCLUSÕES

Com a crescente utilização de Geração Distribuída para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica em suas plantas industriais, as empresas siderúrgicas adotam a utilização de usinas térmicas de cogeração internas, em paralelo com a alimentação via concessionária local, devido a disponibilidade e a viabilidade do aproveitamento dos gases gerados nos Altos Fornos. Neste caso, é de fundamental importância a elaboração de um estudo de estabilidade

transitória de forma definir os parâmetros e os limites de operação do sistema que irão garantir a continuidade desejada, após a ocorrência de distúrbios na concessionária local.

Mediante os resultados obtidos e apresentados neste trabalho, conclui-se que a implementação do ilhamento da UTE e da rejeição das cargas não prioritárias na SE Aciaria, solucionou de forma eficaz o problema de desligamento total da planta, provocado por um distúrbio de perda da concessionária. A oscilografia apresentada, comprova na prática, que após a implementação da solução definida, ocorreu um evento real de perda da concessionária, porém o sistema foi capaz de estabilizar e operar com as cargas definidas como prioritárias.

REFERÊNCIAS

- ABGD – Associação Brasileira de Geração Distribuída. Quantidade de Usinas de Geração Distribuídas no Brasil, acessado em 22/03/2018. Acesso em: 17/03/2018, disponível em: <https://www.geracaodistribuida.org/copia-mapa-do-mercado-3>.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída por: SRD. Publicado em 28/09/2015 e última modificação em 23/02/2018. Acesso em: 17/03/2018, disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>.
- IEEE Transactions on Power Systems, Aug 1994, v. 9, i. 3, p. 1698-1708.
- INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. O que é Geração Distribuída. Acesso em: 17/03/2018, disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd.
- Júnior, José Carlos de Melo Vieira. Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP, 10 de Março de 2006.