



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**O IMPACTO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SINCRONOS NA PROTEÇÃO E RELÉS**

**Gabriel Benmouyal  
SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC**

**RESUMO**

Geradores síncronos possuem dois tipos de limites operacionais: térmico e estabilidade, que são normalmente definidos no plano P-Q. Limitadores, incorporados no Regulador Automático de Tensão (AVR) do gerador, evitam que este ultrapasse esses limites. A combinação desses limitadores e a natureza do AVR terão impacto em funções de proteção do gerador. O objetivo deste artigo é apresentar uma análise da tecnologia dos limitadores incorporados no AVR e discutir o impacto do sistema de excitação com um AVR ou um estabilizador do sistema de potência (PSS) nos limites de estabilidade do gerador, apresentando uma nova técnica numérica para determinar os limites.

**PALAVRAS-CHAVE**

Gerador, AVR, PSS, proteção, regulação de tensão

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Existem três tipos de limites térmicos ([1]–[4]) do gerador: o limite da corrente da armadura que está diretamente relacionado à potência nominal do gerador, o limite da corrente de campo e o limite do núcleo de ferro do fim do estator. O limite da estabilidade em regime (steady-state stability limite - SSSL) é uma consequência direta da equação de transferência de potência entre um gerador e o sistema que o mesmo está alimentando. Esses diferentes limites são analisados na próxima seção.

**1.1 Limites Térmicos Operacionais do Gerador**

Na Figura 1, estão representados os três tipos de limites térmicos encontrados em um gerador. Assumindo que a potência é medida em valores “por-unidade” (p. u.), a metade de um círculo com raio unitário representa a capacidade máxima teórica do gerador (“generator theoretical maximum capability” – GTMC). Esse limite se deve às perdas ôhmicas da corrente da armadura e corresponde simplesmente ao valor nominal em MVA do gerador.

O limite do núcleo de ferro do fim do estator é consequência do fluxo de dispersão nas espiras existente na região final do gerador e os limites das correntes de campo e da armadura dependem da tensão do gerador.

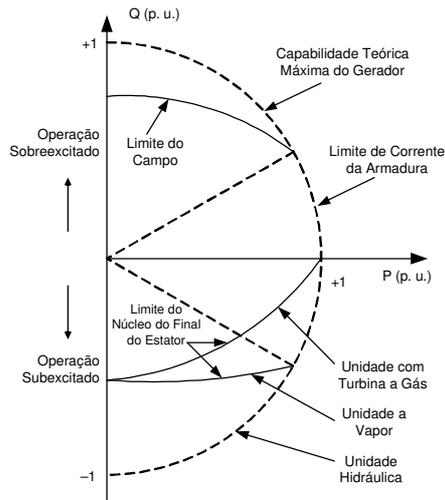


FIGURA 1 - Limites térmicos operacionais do gerador

1.2 Limite de Estabilidade em Regime Tradicional do Gerador com Rotor Cilíndrico

O limite de estabilidade em regime de um gerador determina a região no plano P-Q onde a operação do gerador vai ser estável no modo normal de operação. O modo normal de operação é aqui definido como uma condição em que somente ocorrem pequenos distúrbios no sistema, diferentes de grandes perturbações como faltas, adição significativa de cargas ou perda de geração. O limite de estabilidade em regime é usado pelos engenheiros de sistemas de proteção em alguns estudos de coordenação e no ajuste da função do limitador de subexcitação (“under-excitation limiter” – UEL) do AVR [1, 5].

Assumindo a tensão nos terminais do gerador,  $E_t$ , como sendo 1.0 p.u., a interseção da curva do SSSL manual com o eixo imaginário é igual a  $-1/X_d$ . Isso indica que para um gerador com  $X_d$  maior do que um, o SSSL manual vai automaticamente invadir o círculo GTMC e o gerador vai se tornar instável quando estiver muito subexcitado. A interseção com o eixo real é no ponto  $1/\sqrt{(X_d+X_e)}$ ; logo, à medida que o valor da impedância externa da linha,  $X_e$ , aumenta, o SSSL manual se torna mais próximo da curva GTMC. Com ambos  $X_d$  e  $X_e$  sendo igual a um, o SSSL e o círculo GTMC coincidem, conforme Figura 3.

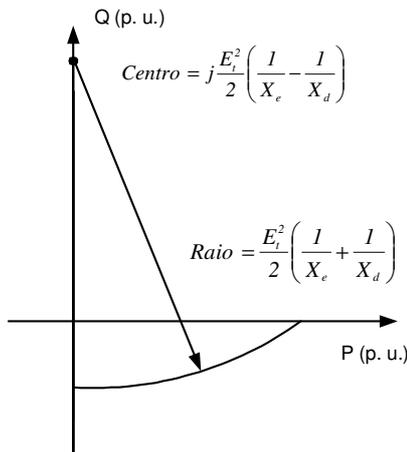


FIGURA 2 - Curva SSSL manual de um gerador com excitação constante

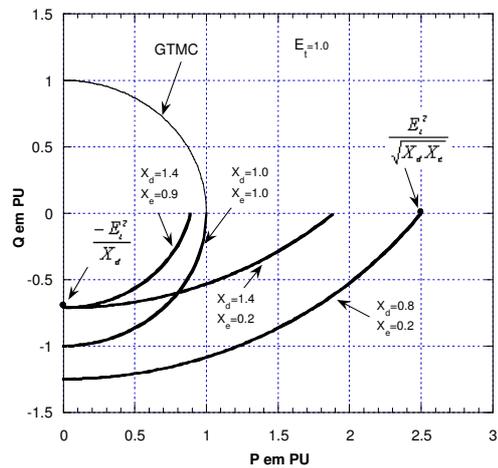


FIGURA 3 - SSSL manual em relação ao círculo GTMC

2.0 - O SISTEMA DE EXCITAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

Este artigo foca nos sistemas atuais de excitação estática, conforme mostrado na Figura 4. Nesses sistemas, a potência de entrada da excitatriz estática é normalmente derivada dos terminais da máquina. Um transformador abaixador (transformador de excitação) alimenta uma ponte retificadora trifásica controlada que converte tensão

AC em tensão DC. A saída DC é conectada ao enrolamento de campo da máquina através de escovas e anéis coletores.

No modo automático, o ponto de ajuste da tensão ("setpoint") é introduzido no ponto de somatória do AVR. Este setpoint da tensão é comparado à medição da tensão de saída do gerador; essa comparação gera um sinal de erro que ajusta o tempo de disparo dos retificadores controlados de silício até que a tensão de saída se torne igual ao setpoint da tensão. Em regime, a tensão de saída do gerador é igual ao setpoint da tensão. No modo manual, tanto o nível da tensão de saída do gerador quanto o nível da corrente de campo (conforme mostrado na Figura 4) estão sob controle manual do operador. Embora ainda seja aplicado em algumas máquinas antigas, o controle manual dos sistemas de excitação não é recomendado por agências como a norte-americana NERC, devido às falhas e desvantagens associadas a este modo de operação.

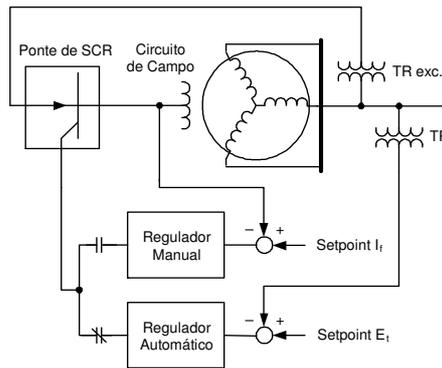


FIGURA 4 - Princípio do AVR com gerador de auto-excitação

A Figura 5 representa o modelo genérico de um sistema de excitação estática, o qual é fornecido, entre outros, por [11]. Tais modelos têm o propósito de servir como diretrizes para os estudos de estabilidade.  $V_{ref}$  é o ajuste da tensão,  $V_c$  é a medição da tensão nos terminais do gerador.

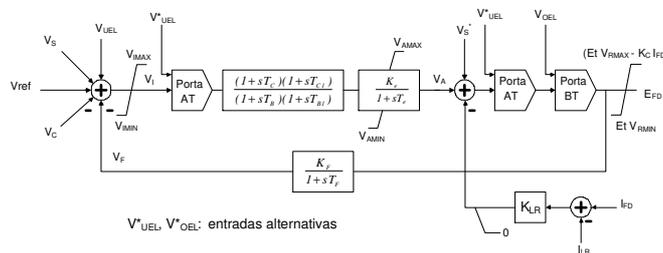


FIGURA 5 - Sistema de excitação IEEE tipo ST1A

### 3.0 - LIMITADORES DE PROTEÇÃO INCORPORADOS NO AVR

As funções de proteção térmica do gerador são incorporadas no AVR por meio de limitadores. A função dos limitadores não é a de dar trip no gerador, mas evitar que o mesmo opere fora dos limites indicados na Figura 1. Usualmente, existem três limitadores que podem ser implementados no AVR: o limitador de subexcitação (ou mínima) (UEL ou MEL), o limitador de sobreexcitação ("overexcitation limiter" – OEL) e o limitador de volt/hertz ("volt/hertz limiter" – VHL). O UEL evita que o gerador opere abaixo dos limites do núcleo de ferro do final do estator, conforme mostrado na Figura 1. Pode também, dependendo do que for mais restritivo, evitar que o gerador opere abaixo do SSSL. O OEL evita que o gerador opere acima do limite de campo da Figura 1. O VHL evita que o gerador opere acima do valor limite volt/hertz máximo.

### 4.0 - O IMPACTO DO AVR NO LIMITE DE ESTABILIDADE EM REGIME DO GERADOR

Até agora, a única fórmula simples disponível para os engenheiros de proteção efetuarem a plotagem do SSSL de um sistema de geração é a que se refere ao caso de um gerador com excitação constante. Esse tipo de limite foi assumido como sendo conservador o suficiente para que possa ser aplicado sem qualquer restrição nos sistemas de geração com AVR ou PSS [5]. Nos próximos parágrafos, será introduzida uma nova técnica para obtenção do limite de estabilidade baseado em pequenos sinais estabilizantes para um sistema de geração com um AVR ou uma combinação de AVR-PSS.

O novo método, denominado “limite baseado nos autovalores”, consiste então em determinar para cada valor da potência real,  $P_i$ , no plano complexo, o valor correspondente da potência imaginária,  $Q_i$ , para o qual todas as partes reais dos autovalores chaveiam para negativo (Figura 6). Após efetuarmos a varredura de um conjunto de valores de  $P$  dentro de um intervalo escolhido, o conjunto correspondente de valores de  $Q$ , conforme definido previamente, constitui o limite da estabilidade baseada nos pequenos sinais estabilizantes.

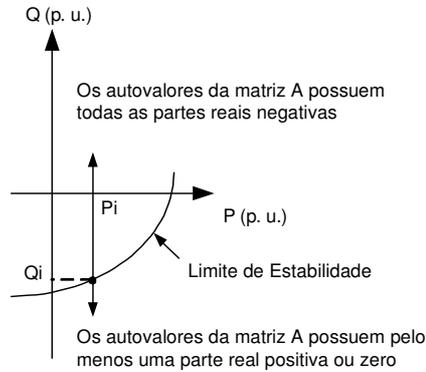


FIGURA 6 - Princípios de determinação do limite baseado nos autovalores (“eigenvalues”)

#### 4.1 Limite de Estabilidade Baseado nos Pequenos Sinais de um Gerador com Regulador Automático de Tensão

##### 4.1.1 Modelo do Gerador com Regulador Automático de Tensão

Quando um AVR é adicionado ao sistema, uma função de transferência adicional tem de ser adicionada ao sistema, conforme mostrado na Figura 7. Nesse ponto, é assumido que um gerador autoexcitado com um sistema simples de excitação estática está sendo usado com função de transferência:

$$\frac{\Delta E_{fd}}{\Delta e_t} = \frac{K_e}{1 + sT_e} \quad (01)$$

Nesta última equação,  $K_e$  é o ganho da excitatriz e  $T_e$  é a constante de tempo da excitatriz.

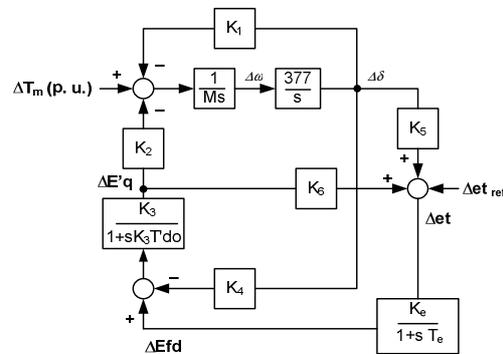


FIGURA 7 - Diagrama de blocos do sistema de potência elementar com sistema de excitação regulado em estado sólido

A equação matricial seguinte fornece a representação do sistema de geração da Figura 7 no domínio espaço/estados:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -K_1/M & 0 & -K_2/M & 0 \\ -K_4/T'_{do} & 0 & -1/(K_3 T'_{do}) & 1/T'_{do} \\ -(K_e K_5)/T_e & 0 & -(K_e K_6)/T_e & -1/T_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (02)$$

##### 4.1.2 Limites de Estabilidade Usando o Método dos Autovalores

Usando o método do limite baseado nos autovalores, a Figura 8 mostra os limites de estabilidade do sistema de potência elementar quando o gerador possui um AVR e quando o ganho do AVR varia de zero a valores maiores.

Não é uma surpresa que se o ganho do AVR for zero, o limite de estabilidade corresponde ao SSSL manual. À medida que o ganho aumenta, pode ser observado que existe um limite a ser fornecido para o ganho antes de a estabilidade infringir os limites do círculo GTMC. Um princípio já bem estabelecido consiste no fato de que o ganho do AVR tem de ser limitado para evitar que o gerador se torne instável devido à falta do torque amortecedor [2, 13]. Baseado na Figura 8, o ganho do AVR deveria ser menor do que 25. Observe que o SSSL manual não se torna o caso limite à medida que o ganho aumenta. Para valores elevados do ganho de AVR, o limite de estabilidade baseado nos pequenos sinais ficará acima do SSSL manual e vai começar a invadir os limites do círculo GTMC.

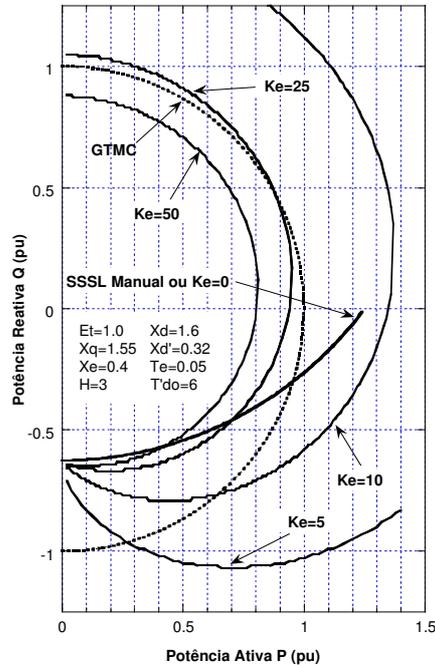


FIGURA 08 - Impacto do ganho do AVR no limite de estabilidade do gerador

## 4.2 Limite de Estabilidade Baseado nos Pequenos Sinais de um Sistema de Geração com AVR e PSS

### 4.2.1 Modelo do Gerador com PSS

Conforme mostrado no parágrafo anterior, o ganho do AVR deve ser limitado para manter o torque amortecedor em um valor aceitável. Aumentar a estabilidade transitória do gerador exige que o ganho do AVR seja o mais alto possível de forma a produzir a tensão de excitação mais alta possível após uma perturbação de grande porte. A estabilidade transitória é definida aqui como a capacidade de o gerador manter o sincronismo quando submetido a um distúrbio transitório severo, tal como uma falta em uma linha de transmissão adjacente. Para atender a esse requisito, os engenheiros de sistemas de potência desenvolveram excitatrizes de alta velocidade equipadas com estabilizadores do sistema de potência ("power system stabilizers" – PSS). Basicamente, um PSS deriva um sinal de erro baseado na velocidade da máquina e injeta esse sinal de erro no ponto de somatória do AVR. O efeito do PSS é aumentar substancialmente o torque amortecedor do gerador, o que, por sua vez, propicia um aumento do ganho.

O diagrama de blocos do sistema de geração com adição do PSS está mostrado na Figura 9. A função de transferência do PSS consiste de um ganho, um filtro passa-altas e um filtro de compensação de fases. Na verdade, um PSS pode requerer circuitos mais complexos e não necessariamente medir a velocidade diretamente [2].



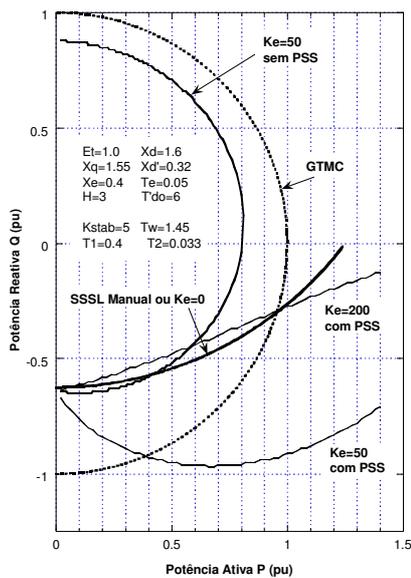


FIGURA 10 - Impacto do PSS no Limite de Estabilidade do Gerador

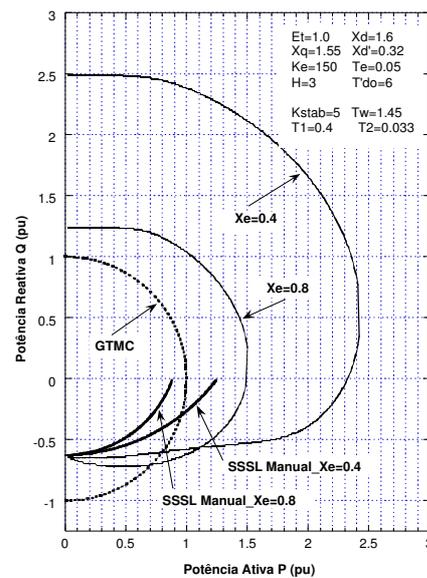


FIGURA 11 - Impacto de Xe no limite de estabilidade do gerador com um PSS

## 5.0 - CONCLUSÕES

1. Os limitadores incorporados no AVR do gerador não dão trip na unidade, mas evitam que o gerador opere nas zonas termicamente perigosas para a máquina.
2. Um limitador de subexcitação é normalmente incorporado no AVR do gerador; esse limitador evita que o gerador opere na região proibida de subexcitação, enviando um sinal de erro para o AVR. Este sinal de erro, por sua vez, aumenta a referência de tensão do AVR de forma que a tensão de saída do gerador seja aumentada. Portanto, a consequência da ação do UEL é aumentar a tensão de saída do gerador.
3. Um limitador de volt/hertz pode ser incorporado no AVR do gerador. Quando solicitado, ele normalmente envia um sinal de erro para o AVR; como consequência, a referência de tensão do AVR é reduzida. Isso reduz a tensão de saída do gerador para trazer de volta a relação volt/hertz ao limite permitido. O limitador de volt/hertz não modifica o valor da frequência ou velocidade do gerador.
4. Um UEL e um limitador de volt/hertz se opõem. Um tem a tendência de aumentar a tensão de saída do gerador, o outro trabalha para reduzir essa tensão. Podem ocorrer situações em que o AVR envia sinais de erros opostos, resultando em oscilações na tensão de saída do gerador.
5. Os limitadores normalmente incorporados no AVR não funcionam no modo manual de operação do sistema de excitação do gerador. A proteção correspondente será re-movida a não ser que exista um sistema de retaguarda independente do AVR. O UEL estará inoperante no modo manual, pois ele normalmente não tem um backup.
6. Ao efetuar a coordenação da característica de perda de excitação com o UEL, lembre-se que a coordenação em regime ou estática não garante uma coordenação dinâmica adequada. Um UEL de ação lenta pode levar à violação da característica LOF durante uma perturbação no sistema.
7. Condições podem ser geradas em que os limites de estabilidade de um gerador com um AVR possam ser piores do que o SSSL manual. Em algumas situações, a operação manual pode nunca ocorrer. O uso do SSSL manual nos estudos de proteção deve ser revisto e reavaliado. Técnicas simples para obtenção dos limites de estabilidade dos sistemas de geração são necessárias e devem ser desenvolvidas pelas agências de definição de normas.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Reimert, Protective Relaying for Power Generation Systems, Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994.

- [3] J. R. Ribero, "Minimum Excitation Limiter Effects on Generator Re-sponse to System Disturbances," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, março de 1991.
- [4] S. S. Choy and X. M. Xia, "Under excitation limiter and its role in preventing excessive synchronous generator stator end-core heating," IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 1, pp. 95-101, fevereiro de 2000.
- [5] Working Group J5 of Power System Relaying Committee, Charles J. Mozina, Chairman, "Coordination of Generator Protection with Generator Excitation Control and Generator Capability", IEEE PES General Meeting, June 2007, Tampa, FL.
- [6] S. B. Farnham and R. W. Swarthout, "Field excitation in relation to machine and system operation," AIEE Trans., vol. 72, pt. III, no. 9, pp. 1215-1223, dezembro de 1953.
- [7] IEEE Power Engineering Society, IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators, 95 TP 102.
- [8] Guide for AC Generator Protection, IEEE Standard C37.102/D7200X, abril de 2006.
- [9] Requirements for Cylindrical Rotor Synchronous Generators, 1989. ANSI Std. C50.13-1989.
- [10] Standard for Requirements for Salient-Pole Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications, 1982. ANSI Std. C50.12-1982.
- [11] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power system Stability Studies, IEEE standard 421.5-1992.
- [12] IEEE Task Force on Excitation Limiters, "Underexcitation Limiter Model for Power System Stability studies", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, setembro de 1995.
- [13] F. P. DeMello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, No. 4, pp. 3163-329, abril de 1969.
- [14] C. K. Seetharaman, S. P. Verma, and A. M. El-Serafi, "Operation of synchronous generators in the asynchronous mode," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, pp. 9289-939, 1974.
- [15] C. R. Mason, "A new loss of excitation relay for synchronous generators," AIEE Trans., vol. 68, pt. II, pp. 1240-1245, 1949.
- [16] J. Berdy, "Loss-of excitation protection for modern synchronous generators," General Electric Co. Document GER-3183.
- [17] R. Sandoval, A. Guzmán, H. J. Altuve, "Dynamic simulations help improve generator protection," 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 17-19 de outubro, 2006.
- [18] Carson W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw Hill International editions 1994.
- [19] The MathWorks, MATLAB The language of Technical Computing, Using MATLAB, Version 6, novembro de 2000.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Gabriel Benmouyal, P.E., recebeu seu B.A.Sc. em Engenharia Elétrica e seu M.A.Sc em Engenharia de Controle pela Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canadá, em 1968 e 1970, respectivamente. Em 1969, ele começou a trabalhar na Hydro-Québec como Especialista em Instrumentação e Controle. Trabalhou em diferentes projetos na área de sistemas de controle de subestação e centros de despacho. Em 1978, foi para a IREQ, onde sua principal área de trabalho foi a aplicação de técnicas digitais e microprocessadores para sistemas de proteção e controle de subestações de transmissão e geração. Em 1997, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. na posição de Engenheiro de Pesquisas. É engenheiro profissional com registro na Província de Québec, é membro sênior do IEEE e atende ao Power System Relaying Committee desde maio de 1989. Ele detém mais de seis patentes e é autor e co-autor de diversos artigos técnicos na área de proteção e controle de sistemas de potência e processamento de sinais.